

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

На правах рукописи

ГАРИПОВ Азат Ильшатovich

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Белый Григорий Иванович

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Современное состояние вопроса.....	11
§1.1. Особенности исследования элементов ЛСТК.....	11
§1.2. Общая устойчивость элементов стальных конструкций	14
§1.3. Выводы по главе.....	18
Глава 2. Прочность элементов ЛСТК.....	19
§2.1. Предварительные замечания.....	19
§2.2. Определение редукции сечения в безразмерных параметрах	22
§2.2.1 Редукция пластинок	22
§2.2.2 Редукция пластинок с продольным усилением	23
§2.2.3 Редукция пластинок с краевым отгибом	26
§2.2.4 Редукция пластинок с промежуточным усилением	29
§2.3. Безразмерные параметры прочности	32
§2.3.1 Коэффициенты редукции предельных усилий элементов ЛСТК	33
§2.3.2 Численно-аналитический метод расчета коэффициентов редукции	36
§2.4. Обратный численный метод расчета прочности элементов ЛСТК	43
§2.4.1 Прочность по заданному деформированному состоянию	43
§2.4.2 Прочность по заданному соотношению усилий	47
§2.4.3 Метод определения параметров деформированного состояния	50
§2.4.4 Обобщение метода на несимметричные сечения ЛСТК.....	53
§2.5. Особенности работы спаренных U-, C- Σ -образных сечений.....	58
§2.6. Выводы по главе.....	60
Глава 3. Общая устойчивость элементов ЛСТК	61
§3.1. Предварительные замечания.....	61
§3.2. Аналитическое решение деформационной задачи устойчивости.....	64
§3.2.1 Изгибная форма (бифуркационная задача)	66
§3.2.2 Изгибная форма (деформационная задача)	67
§3.2.3 Крутильная форма (бифуркационная задача)	70
§3.2.4 Изгибно-крутильная форма (бифуркационная задача)	71
§3.2.5 Изгибно-крутильная форма (деформационная задача).....	74
§3.3. Влияние редукции сечения на общую устойчивость	76
§3.4. Метод определения параметров деформированного состояния	78
§3.5. Аналитическое решение задачи устойчивости элемента ЛСТК	82

§3.6. Выводы по главе.....	87
Глава 4. Численные и экспериментальные исследования общей устойчивости элементов ЛСТК.....	88
§4.1. Численные эксперименты	88
§4.1.1 Постановка задачи.....	89
§4.1.2 Численно-аналитическое решение	92
§4.1.3 Численное решение методом конечных элементов.....	92
§4.1.4 Результаты.....	96
§4.2. Физические эксперименты	103
§4.2.1 Цель и задачи экспериментов	103
§4.2.2 Объект исследования	103
§4.2.3 Проведение испытаний.....	108
§4.2.4 Краткая характеристика полученных результатов	111
§4.2.5 Расчет методом конечных элементов	115
§4.2.6 Сравнение результатов расчетов и испытаний	119
§4.3. Выводы по главе.....	122
Глава 5. Практические методы расчета элементов ЛСТК	123
§5.1. Предварительные замечания.....	123
§5.2. Расчет прочности.....	124
§5.2.1 Проверка прочности при раздельном действии усилий	124
§5.2.2 Проверка прочности при сжатии с изгибом в одной плоскости	127
§5.2.3 Проверка прочности при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом.....	130
§5.3. Расчет общей устойчивости	132
§5.3.1 Проверка устойчивости по изгибной форме	132
§5.3.2 Проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме.....	134
§5.3.3 Упрощенная проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме	136
§5.3.4 Сравнительный анализ и верификация результатов	138
§5.4. Выводы по главе.....	142
Заключение	144
Список использованных источников	145
Приложение А (обязательное) Результаты верификационных расчетов.....	157
Приложение Б (обязательное) Справка о внедрении результатов работы.....	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Особенностью работы элементов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) является потеря местной устойчивости и устойчивости формы сечения в упругой стадии, до наступления предельного состояния, что учитывается в расчетах использованием сниженных (редуцированных) геометрических характеристик поперечного сечения, основной метод определения которых базируется на исследованиях Т. Кармана и Д. Винтера. Предельным состоянием в элементах ЛСТК при расчете как прочности, так и устойчивости является достижение расчетного сопротивления по пределу текучести в наиболее нагруженной точке поперечного сечения. При разработке в России свода правил проектирования ЛСТК были заимствованы европейские методы расчета, которые оказались не гармонизированы с отечественным сводом правил проектирования стальных конструкций. Кроме того, теоретические основы нормативного метода проверки общей устойчивости элементов ЛСТК имеют существенные недостатки, а практическое их использование затруднено большим количеством промежуточных вычислений. Ошибки в расчетах уже не раз приводили к авариям и разрушениям ЛСТК. Учитывая изложенное, вопрос разработки достоверных, понятных отечественному инженеру и прозрачных в своих теоретических основах методов расчета стрелневых элементов ЛСТК является наиболее актуальным.

Степень разработанности темы исследования.

Расчёт элементов стальных конструкций основан, как известно, на хорошо проработанных теории тонкостенных стержней В.З. Власова и деформационной теории расчёта упругих стержней, которая разработана В.З. Власовым, Л. Н. Воробьевым, Б. М. Броуде, В. Г. Воронцовым и обобщена Е. А. Бейлиным. Метод приближенного аналитического решения системы дифференциальных уравнений равновесия тонкостенных стержней открытого профиля по пространственно-деформированной схеме и метод численно-аналитического расчета стержней с учетом развития упругопластических деформаций разработаны

Г. И. Белым. Эти методы применялись для решения различных задач устойчивости с учетом упругопластической стадии работы материала в исследованиях Н. Н. Родикова, С. Н. Пичугина, С. Н. Сергеева, П. А. Пяткина, В. В. Михаськина, А. В. Аскинази и других, а также для решения задач устойчивости элементов ЛСТК в работах И. В. Астахова, А. Ю. Кузнецова, М. О. Смирнова.

Вопросами устойчивости сжатых пластин и оболочек в разное время занимались Ф. Блейх, Б. М. Броуде, В. З. Власов, А. С. Вольмир, А. А. Ильюшин, С. П. Тимошенко и многие другие. Отдельно стоит отметить работы Т. Кармана и Д. Винтера, разработавших метод «эффективной ширины», который является основной практической методики расчета элементов ЛСТК, а также исследования Б.М. Броуде и В. И. Моисеева, на основании которых последним разработана отечественная нормативная методика обеспечения местной устойчивости при упруго-пластической работе материала. Вопросами потери устойчивости формы сечения занимались С. П. Тимошенко, Д. Гир и другие. Вопросами взаимного влияния различных форм потери местной устойчивости и влияния потери местной устойчивости на общую устойчивость, а также вопросами остаточных напряжений и начальных несовершенств занимались Д. Винтер, Д. ДеВольф, Т. Пекоз, Д. Родес, Г. Д. Хэнкок и многие другие. Эффективный метод «конечных полос» для определения критических напряжений и соответствующих форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов был разработан и получил свое развитие в работах М. С. Чанг, Я. К. Чанг, Б. В. Шафера и других.

Исследованию вопросов расчета и проектирования ЛСТК в России посвящены работы Э. Л. Айрумяна, В. Ф. Беляева, И. И. Ведякова, В. В. Егорова, В. В. Зверева, И. И. Крылова, В. В. Катюшина, В. А. Рыбакова, А. Р. Туснина и других.

В настоящей диссертации получает развитие метод аналитического решения задач устойчивости Г. И. Белого. С использованием некоторых допущений разработан аналитический метод расчета коэффициентов общей устойчивости элементов ЛСТК.

Цель исследования – разработка методов расчета прочности и общей устойчивости стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций, гармонизированных с отечественным сводом правил проектирования и учитывающих потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения путем редуцирования геометрических характеристик.

Задачи исследования:

1. Разработать быстродействующий численный метод расчета предельных напряженно-деформированных состояний в поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий.

2. Обобщить обратный численно-аналитический метод расчета общей устойчивости на элементы ЛСТК.

3. Выполнить экспериментальные исследования общей устойчивости элементов ЛСТК.

4. Провести верификацию разработанных методов расчета путем сопоставления полученных с их помощью результатов с результатами расчетов методом конечных элементов, а также результатами проведенных испытаний.

5. Разработать практические методы расчета прочности и устойчивости элементов ЛСТК при общем загрузении, гармонизированные с отечественным сводом правил.

Объект исследования – стержневой элемент легких стальных тонкостенных конструкций.

Предмет исследования – влияние потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения на прочность и общую устойчивость.

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».

Методология и методы исследования.

Методологическую основу исследования составляют общенаучные и специальные методы. Работа стержневых элементов ЛСТК исследуется методами аналитического и численного моделирования. Метод анализа используется для изучения частных вопросов: потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения, прочности в поперечном сечении и общей устойчивости стержня. Метод синтеза используется для исследования общей устойчивости стержня с учетом потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения. Для верификации разработанных методов расчета выполнены численные и экспериментальные исследования.

Теоретическую основу исследования составляет техническая теория тонкостенных стержней открытого профиля и деформационная теория расчета упругих стержней в сочетании с методом упругих решений для учета редукции сечения.

Научная гипотеза: полагается, что обратный численно-аналитический метод позволит учесть потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения путем редуцирования геометрических характеристик с учетом фактического распределения напряжений при решении задач прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Разработан обратный численный метод расчета прочности элементов легких стальных тонкостенных конструкций по заданным соотношениям усилий.
2. Доказано, что при использовании аппроксимации поверхности прочности наиболее нагруженного сечения задача общей устойчивости имеет аналитическое решение.
3. Установлено, что учет фактической редукции сечения при общем нагружении позволяет выявить резервы прочности и общей устойчивости.

Теоретическая значимость работы:

1. Получено обратное численно-аналитическое решение задачи общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций, учитывающее фактическую редукицию сечения.
2. Получено аналитическое решение задачи общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций.

Практическая значимость работы состоит в разработке гармонизированных с отечественным сводом правил проектирования стальных конструкций практических методов расчета прочности и общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численный метод расчёта предельных напряжённо-деформированных состояний в редуцированном поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий.
2. Адаптация обратного численно-аналитического метода расчёта общей устойчивости на элементы ЛСТК с учётом фактической редукиции сечения.
3. Результаты экспериментальных исследований устойчивости элементов ЛСТК.
4. Практические методы расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, гармонизированные с отечественным сводом правил.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

- использованием технической и деформационной теории расчета тонкостенных стержней открытого профиля в сочетании с методом упругих решений для учета редукиции сечения;
- использованием нормативного метода определения редуцированных геометрических характеристик поперечных сечений элементов ЛСТК при общем нагружении;
- верификацией разработанных методов расчета путем сравнения полученных результатов с результатами расчетов методом конечных элементов, а также результатами испытаний.

Личный вклад автора диссертации. Все научные результаты, представленные в настоящей диссертации, получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежит постановка задач и формулировка основных положений, определяющих научную новизну исследований.

Апробация результатов исследования.

Основные выводы и результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались на конференциях:

- Круглый стол АРСС «Возможность применения стали в многоэтажном жилом строительстве и решения на стальном каркасе в ИЖС» в рамках 30 Международной промышленной выставки «Металл-Экспо». Москва, 31 октября 2024 г.;
- 78-я научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика». Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 21 ноября 2024 г.;
- IX Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Пенза. 21-24 мая 2025 г.;
- Всероссийский научно-технический совет «Металлические и деревянные конструкции» и II международно-практическая конференция «Сталь. Дерево. Сейсмика». ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Кемерово, 28-30 мая 2025 г.;
- XI международный форум «100+ ИНТЕРКОНСТРОЙ» в рамках международного форума и выставки «100+ TechnoBuild». Екатеринбург-Экспо. Екатеринбург. 30 сентября – 3 октября 2025 г.;
- 79-ая международная научно-практическая конференция СПбГАСУ «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика». Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 21 ноября 2025 г.

Публикации. Научные результаты, представленные в настоящей диссертации, опубликованы в четырех печатных работах [33–34; 62–63], две из которых

– в соавторстве. Все работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы подтверждается справкой (приложение Б).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем работы – 190 страниц машинописного текста, включая 8 таблиц, 62 рисунка, 151 формулу. Список литературы содержит 168 наименований, в том числе 59 – на иностранных языках.

Работа выполнена при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

§1.1. Особенности исследования элементов ЛСТК

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) используются в строительстве за рубежом с середины XX века [140; 154; 165; 166]. Особенностью работы ЛСТК является потеря местной устойчивости в упругой стадии, до достижения предельного состояния по критериям прочности и общей устойчивости. В связи с этим основное значение имеет вопрос закритической – после потери местной устойчивости – работы тонких пластинок.

Широкому распространению нового типа конструкций способствовало издание первого на тот момент стандарта проектирования ЛСТК [111], где для учета закритической работы пластин, составляющих стержень, использовался метод эффективной ширины, предложенный Карманом [138] и развитый Винтером [162]. Формула для расчета эффективной ширины пластинки в [111] была получена Винтером на основании обработки результатов многочисленных испытаний, и в редакции норм 1968 года, с учетом новых исследований [163-167], она была несколько уточнена [168].

Харви в работе [136] и Чилвер в работах [127; 128] предложили использовать краевой отгиб для усиления сжатой полки и в последующих редакциях норм [111] были указаны требования к размерам отгиба, обеспечивающие достаточную жесткость для закрепления полки. Экспериментальные и теоретические исследования Дуайта [134] и Шарпа [160] показали, что при использовании краевых отгибов возможна потеря устойчивости по формам, которые являются промежуточными между потерей местной устойчивости (отдельной пластины) и общей устойчивости (стержня в целом), и были связаны с деформацией контура поперечного сечения. Это явление в отечественной литературе принято называть потерей устойчивости формы сечения.

Бийлаард и Фишер в работе [120] показали, что критические напряжения потери местной устойчивости практически не зависят от гибкости стержня. Ис-

следованиям взаимного влияния различных форм потери устойчивости элемента (от местной до общей) занимались Родес и Харви [152] в Европе, а также группа ученых Корнеллского университета в Америке: ДеВольф, Десмонд, Пекоз и Винтер [130–133; 147], которые на основании исследований работы краевых отгибов полков [131] и промежуточных элементов усиления пластин [132] предложили учитывать потерю устойчивости формы сечения путем редуцирования площади элемента усиления.

Каррен и Винтер исследовали распределение механических характеристик стали вдоль контура поперечного сечения элементов ЛСТК [139] и выявили значительное упрочнение в зонахгиба. Исследованию критической работы пластин с учетом упругопластических деформаций были посвящены работы Булсона [125], Койтера [141], Стоуэла [161].

Пекоз предложил унифицированную формулу для коэффициента редукиции по ширине [129; 148; 149] сжатых и изгибаемых стенок и сжатых полков, при чем в случае расчета критического напряжения в сжатой полке (пластинки с односторонним закреплением) в запас устойчивости было принято значение коэффициента $k_{\sigma} = 0,43$, соответствующее аналитическому решению для длинной пластинки. Бамбах и Расмуссен исследовали работу пластинок с односторонним закреплением при внецентренном сжатии и изгибе экспериментально [116] и теоретически [117], и предложили формулы для расчета критических напряжений и эффективной ширины [118].

Анализ устойчивости формы поперечного сечения был изначально затруднен большим разнообразием форм профилей и элементов усиления. В связи с этим приближенные аналитические зависимости используются только для широко распространенных одинарных или двойных краевых отгибов и промежуточных элементов усиления – канавок различной формы. Для расчета критических напряжений потери устойчивости формы сечения в более сложных случаях использовали метод конечных элементов, однако анализ был затруднен большим количеством плоских КЭ, которыми моделируется стержень, а также большим количеством близких форм потери устойчивости.

Предложенный Чанг и Чанг «метод конечных полос» [126] («finite strip method», «FSM»), в котором стержень разбивается на полосы, длина которых равна длине стержня, позволил существенно упростить анализ. Меняя длину полос от малых значений, сопоставимых с размерами элементов поперечного сечения, до расчетной длины стержня, можно получить зависимость критических напряжений от длины полуволны формы потери устойчивости. Дальнейшее развитие метод получил в работах Фан и Чанг [135], Лау и Хэнкок [142], [143].

Шафер исследовал влияние геометрических несовершенств и остаточных напряжений [159], а также взаимное влияние форм потери устойчивости [155]. Для определения критических напряжений он предложил метод конечных полос с ограничениями ("constrained finite strip method", "cFSM") [144; 158] и разработал реализующую его программу "CUFSM" с открытым исходным кодом. Этот метод позволил в одной модели кроме совместного расчета также рассчитывать раздельно местную устойчивость, устойчивость формы поперечного сечения и общую устойчивость, что упрощает анализ результатов.

Также Шафер предложил "прямой метод расчета прочности" ("direct strength method") [156; 157], суть которого состоит в использовании результатов линейного анализа устойчивости по методу конечных полос и геометрических характеристик полного сечения для расчета прочности и устойчивости без расчета эффективных геометрических характеристик. Несмотря на то, что прямой метод расчета прочности Шафера имеет ряд существенных ограничений, отмеченных в работе [156], он используется в качестве альтернативного метода расчета в североамериканских нормах [112].

На момент начала разработки европейских норм проектирования стальных конструкций [114; 115] теория расчета ЛСТК была достаточно детально проработана и «Еврокоды» вобрали в себя наиболее актуальные на тот момент исследования.

В отечественной литературе теория Кармана [138] получила свое развитие в трудах Б. М. Броуде [46; 50; 51], В. З. Власова [55], А. С. Вольмира [56], А. А. Ильюшина [73], С. П. Тимошенко [105] и других. Отдельного внимания за-

служивают работы В. И. Моисеева [84–89], которые посвящены исследованию устойчивости пластинок за пределом упругости и легли в основу норм проектирования стальных конструкций, при этом был реализован принцип «равноустойчивости стержня и элементов поперечного сечения» [90]. Однако применение ЛСТК ограничивалось использованием профилированных стальных настилов, работу которых исследовал Е. И. Шкловский [109]. Он применил метод Кармана-Винтера для определения эффективной ширины сжатых полок, в то время как местная устойчивость стенок обеспечивалась расчетом, что и легло в основу нормативной методики.

В начале нового века ЛСТК постепенно начинают внедряться в практику строительства в России. В 2016 году была издана первая редакция норм проектирования ЛСТК [2], которая преимущественно является заимствованием европейских норм [113; 114; 115], но включила в себя и ряд положений североамериканских норм [112]. Теоретические вопросы расчета и проектирования ЛСТК в России в этот период исследовали Э. Л. Айрумян [3; 91], В. В. Зверев и другие [93], В. А. Рыбаков [98], А. Р. Туснин [106], [107], [108]. Соединения элементов ЛСТК исследовали И. И. Ведяков и другие [52], И. Г. Катранов [74], [75]. Работу элементов ЛСТК в составе конструктивных систем исследовали Э. Л. Айрумян [4], В. В. Зверев и другие [72]. Вопросы совершенствования методов расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК занимались Г. И. Белый в работах [21–25], И. В. Астахов [6], А. Ю. Кузнецов [35; 78; 79], М. О. Смирнов [39; 40; 100–102].

§1.2. Общая устойчивость элементов стальных конструкций

В основе теории устойчивости стержневых элементов лежат работы Л. Эйлера [110], Ф. Энгессера, Ф. С. Ясинского, Т. Кармана, Ф. Шенли. Развитием теории устойчивости в разное время занимались Г. Е. Бельский [41–44], Блейх [121], А. В. Геммерлинг [64–66], Ежек [137], С. Д. Лейтес [80–82], А. А. Пиковский [92], А. Р. Ржаницын [96], Н. С. Стрелецкий [104], и многие дру-

гие. Исследованиям изгибно-крутильной формы потери устойчивости посвящены работы Митчелла [145], Прандтля [150], Тимошенко [105].

В. З. Власовым была создана и обоснована прикладная теория прочности, устойчивости и колебаний тонкостенных упругих стержней открытого профиля [53-55]. Ему удалось существенно упростить общие уравнения цилиндрических оболочек используя предположения об отсутствии сдвигов в срединной поверхности, и об отсутствии деформаций контура поперечного сечения. А.Л. Голденвайзер в работе [67] рассматривал стержневой элемент в качестве цилиндрической оболочки, учитывая сдвиговые деформации срединной поверхности и отмечал, что допущение об отсутствии деформации контура поперечного сечения ведёт к занижению несущей способности элемента. Теория тонкостенных стержней Власова тем не менее позволила рассмотреть ряд новых задач устойчивости для различных частных случаев нагружения [48; 95].

Для отражения в расчетах действительной – пространственной – работы стержня необходимо было решить проблему расчета по деформированной схеме с учетом развития пластических деформаций, наличия начальных несовершенств, которые стимулируют пространственную деформацию тонкостенного стержня (изгиб в двух плоскостях и закручивание). Первыми исследованиями в этой области стали работы Б.М. Броуде [49], С.П. Вязьменского [61]. Дальнейшее развитие теория получила в работах как отечественных [7–12; 68–71], так и зарубежных авторов [146].

Уравнения равновесия пространственно-деформируемого тонкостенного стержня с учётом различных предположений получены в работах Б.М. Броуде [47–49], Л.Н. Воробьева [57], С.П. Вязьменского [59–61], Е.А. Бейлина [8–14].

Б.М. Броуде на основе деформационной теории тонких стержней Кирхгофа-Клебша получил уравнения равновесия [49], учитывающие разницу в кривизне отдельных волокон. В работе [47] он показал, что стремление к линеаризации уравнений равновесия при решении задачи устойчивости внецентренно-сжатого стержня может привести к возникновению неточностей. В той же работе он отметил, что при внецентренном сжатии стержня в плоскости большей жесткости де-

формации кручения возникают с самого начала нагружения, что следует из рассмотрения нелинейных уравнений равновесия и подтверждается экспериментально.

Е. А. Бейлин предложил уравнения равновесия [8], учитывающие и разницу в кривизне отдельных волокон, и разницу в углах поворота, чем внёс большой вклад в развитие деформационной теории устойчивости.

А. З. Зарифьян, используя метод упругих решений А. А. Ильюшина [73], обобщил уравнения равновесия тонкостенных стержней открытого профиля с учётом упругопластических деформаций [70–71]. И. А. Биргер предлагал использовать метод переменных жесткостей [45], позволяющий варьировать жесткость системы. А. В. Геммерлинг предлагал для учета упругопластических деформаций использовать метод двух расчетных сечений [66].

В.П. Коломиец предложил метод [76] определения напряженно-деформированного состояния в сечении балки при сложном нагружении, использующий действительную диаграмму работы стали для учета упругопластических деформаций. Касательные напряжения предполагались малыми и их влияние на развитие пластической составляющей деформации не учитывалось. Этот метод был усовершенствован для учета бимоента двумя авторами независимо друг от друга: Р.А. Скрипниковой в работе [99] и Г.И. Белым в работах [18–19], где также учитывались касательные напряжения и деформации сдвига.

Несмотря на то, что теория расчета тонкостенных стержневых элементов стальных конструкций хорошо проработана, предложенные разными авторами системы дифференциальных уравнений равновесия по пространственно-деформированной схеме не предполагают решения в замкнутом виде, что отмечают в своих работах А. А. Пиковский [92], Р. А. Скрипникова [99], А. З. Зарифьян и А. Н. Дудченко [71].

Г. И. Белый в работе [13] предложил приближенный аналитически-численный метод расчёта тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме, в соответствии с которым действительные функции пространственных перемещений аппроксимируются линейной комбинацией функ-

ций, получаемых из расчета по недеформированной схеме и из решения бифуркационной задачи устойчивости. Этот метод получил название «алгоритм «Стержень» и использовался во многих работах [14–20]. Расчет устойчивости с использованием алгоритма «Стержень» выполнялся пошагово по приращениям нагрузки. На каждом шаге определялось равновесное состояние с учетом неупругих деформаций, которые моделировались приложением фиктивных сил.

Разработанный Г. И. Белым метод позволили решить ряд практических задач. Н. Н. Родиков исследовал работу двутавров при сжатии с двухосным эксцентриситетом с учетом начальных несовершенств и остаточных напряжений [38; 97]. П. А. Пяткин в работе [94] и В. В. Михаськин в работе [83] исследовали прочность и устойчивость тонкостенных стержней, усиливаемых под нагрузкой с использованием болтовых и сварных соединений. В. Ю. Аскинази занимался вопросами пространственной устойчивости рам переменной жесткости [5].

Алгоритмы «Сечение» и «Стержень» были распространены Г.И. Белым на расчет ЛСТК [21–23; 35], что позволило решить ряд новых задач в этом направлении. И.В. Астахов в работе [6] исследовал пространственную устойчивость тонкостенных холодногнутых швеллеров толщиной до 4 мм, загруженных сжимающей нагрузкой с двухосными эксцентриситетами, а А.Ю. Кузнецов [78–79] – пространственную устойчивость элементов ЛСТК составного сечения. М. О. Смирнов исследовал прочность и устойчивость элементов ЛСТК [100–102] и отмечал наличие значительного резерва устойчивости стержней по изгибно-крутильной форме.

Совершенствованию численно-аналитических методов расчета стержневых элементов посвящены также работы [24–27]. В работе [28] Г. И. Белый предложил «обратный» метод расчета прочности и устойчивости, в соответствии с которым по заданному деформированному состоянию в наиболее нагруженном поперечном сечении стержня устанавливаются условия загрузки на опорах. М. О. Смирнов в работе [102] установил, что прямой и обратный методы расчета дают практически идентичные результаты, отмечая при этом простоту в использовании последнего. «Обратный» метод позволяет выполнять расчет по прираще-

ниям деформаций, что позволило исследовать ниспадающую ветвь кривой деформация-нагрузка для учета закритической стадии работы стержней при проектировании защиты от прогрессирующего обрушения [30], [31]. «Обратный» метод получил своё развитие применительно к ЛСТК в работах М.О. Смирнова [40; 101–102].

При использовании «обратного» метода расчета все возможные загрузки стержня на опорах могут быть определены путем перебора всех возможных деформированных состояний в наиболее нагруженном поперечном сечении, как предлагается в работах [29; 101]. В статье [30] автором диссертации предложено использовать метод бисекции для расчета единственного параметра распределения деформаций в наиболее нагруженном поперечном сечении. Эта идея нашла свое отражение в работах [31; 32; 36; 37]. Основным приоритетом в развитии обратного метода является разработка эффективных алгоритмов расчета параметров распределения деформаций в сечении для более сложных случаев загрузки.

§1.3. Выводы по главе

1. Основным способом учета потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения при решении задач прочности и устойчивости элементов ЛСТК является полуэмпирический метод эффективных (редуцированных) геометрических характеристик поперечного сечения. Достоверность метода подтверждается результатами многочисленных испытаний.
2. Российские нормы проектирования ЛСТК [2] заимствовали, кроме прочего, европейскую методику расчета общей устойчивости [113–114], не гармонизированную с отечественным сводом правил [1].
3. Использование технической и деформационной теорий расчета тонкостенных стержней открытого профиля позволяют учитывать фактическую редуцию сечения при решении задач общей устойчивости элемента ЛСТК.
4. «Обратный» метод расчета прочности и устойчивости элементов ЛСТК может быть усовершенствован путем разработки быстродействующего алгоритма расчета на заданное соотношение усилий.

ГЛАВА 2. ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК

§2.1. Предварительные замечания

Особенностью работы элементов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) является потеря местной устойчивости (потеря устойчивости пластин) и/или устойчивости формы поперечного сечения при действии сжимающих нормальных напряжений вдоль оси стержня меньших, чем предел текучести. Эти деформации являются упругими, поэтому при расчете сечения на действие различных сочетаний усилий учитывают различные же схемы потери устойчивости.

В настоящее время наиболее общим подходом к расчету прочности элементов ЛСТК является учет потери устойчивости пластин и формы сечения путем редуцирования (снижения) геометрических характеристик сечения по методу Кармана-Винтера. В соответствии с этим методом нелинейное распределение напряжений по ширине пластинки, вызванное её выгибом из плоскости, заменяется линейным, но при этом часть пластинки выключается из работы, как показано на рисунке 2.1.

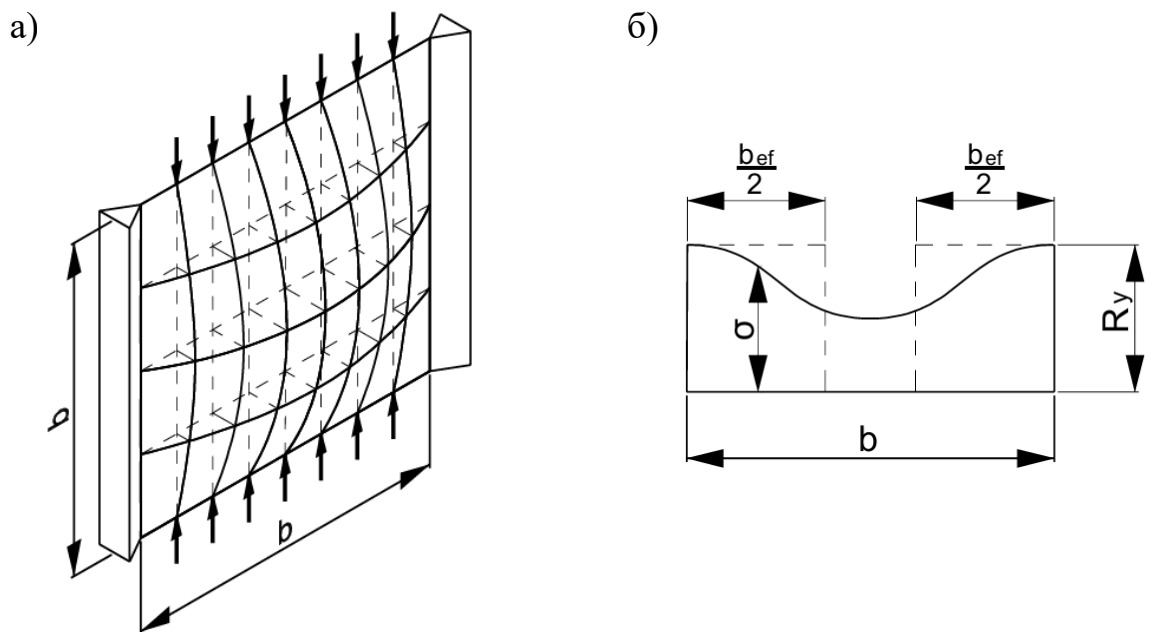


Рисунок 2.1 – Закритическая работа пластинки: а) деформированная схема; б) распределение напряжений в поперечном сечении (см. [164] Fig. 1, Fig. 2).

Основным критерием редукиции пластинки является критическое напряжение, которое рассчитывается в зависимости от условий закрепления и распределения напряжений по ширине пластинки. Относительная ширина рабочей части пластинки определяется коэффициентом редукиции, который связан с критическим напряжением пластинки формулами, полученными по результатам статистической обработки результатов испытаний. Расположение выключаемого из работы участка пластины определяется в зависимости от условий закрепления и распределения напряжений по ширине пластинки.

Кроме редукиции по ширине пластинки, учитывающей потерю местной устойчивости этой пластинки в предположении абсолютной жесткости её закреплений, используют также и редукицию по толщине для учета потери устойчивости формы сечения. При этом критические напряжения потери устойчивости формы сечения либо рассчитывают различными численными методами (методом конечных элементов, методом конечных полос), либо используют приближенный метод для наиболее распространенных схем продольного усиления пластин (краевых отгибов полок или продольных канавок).

В нормативном методе определения редуцированных характеристик сечения используются формулы, в которых размеры отдельных пластин и поперечного сечения в целом, а также напряжения представлены в единицах измерения. Это затрудняет исследование прочности сечений одинаковой формы, но разных размеров, и/или изготовленных из сталей разных марок, как и затрудняет анализ эффективности усиления пластинок краевыми отгибами полок или продольными канавками.

При исследовании прочности элемента ЛСТК после определения редуцированных геометрических характеристик сечения требуется рассчитать новое распределение напряжений, которому будет соответствовать другая схема редукиции, поэтому расчет редукиции по фактическому распределению напряжений является итерационным, при чем скорость сходимости такого расчета низкая. Учитывая, что расчет редуцированных геометрических характеристик сечения ложится

на плечи инженера, широкое использование ЛСТК ограничивается сложностью их проектирования.

Для исследования прочности элементов ЛСТК в работе [40] было предложено использовать «обратный» метод расчета, предложенный впервые Г. И. Белым в работе [28]. За одну итерацию расчета метод позволяет определить усилия в сечении, соответствующие заданному распределению деформаций, что позволяет путем простого перебора различных предельных деформированных состояний определить всевозможные предельные значения усилий в сечении. Однако практическое применение этого метода ограничено было отсутствием метода расчета на заданное соотношение усилий.

В качестве основных задач совершенствования методов расчета элементов ЛСТК на прочность в поперечном сечении, учитывая вышесказанное, можно выделить следующие:

- представить метод определения редуцированных геометрических характеристик в безразмерных параметрах;
- усовершенствовать «обратный» метод исследования прочности ЛСТК путем разработки алгоритма расчета на заданное соотношение усилий;
- оптимизировать «обратный» метод исследования прочности, учитывая характерные особенности элементов ЛСТК, а также обобщить его на несимметричные сечения;
- исследовать работу поперечных сечений, наиболее часто встречающихся в практике проектирования;
- разработать практический метод расчета прочности элементов ЛСТК, используя который инженер сможет использовать табличные данные и не рассчитывать редукицию поперечного сечения.

Материал главы представлен в порядке от частных вопросов к общим.

§2.2. Определение редукции сечения в безразмерных параметрах

§2.2.1 Редукция пластинок

Представим нормативную методику определения эффективной (рабочей) части сжатых пластинок элементов ЛСТК с использованием безразмерных параметров, удобных для расчета и анализа.

Критическое напряжение в наиболее нагруженной точке пластинки представим в безразмерном виде

$$\bar{\sigma}_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{R_y} = \frac{k_\sigma}{12(1 - \nu^2)} \cdot \frac{\pi^2}{\bar{\lambda}^2}, \quad (2.1)$$

где $\bar{\lambda} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – условная гибкость пластины в соответствии с СП 16.13330 [1],

$k_\sigma = f(\psi)$ – коэффициент учёта условий закрепления по таблицам 7.2 и 7.3 [2] (см. также Table 4.1, Table 4.2 [115]), или по формулам (7.29)-(7.30) [2] для отгиба полки;

$\psi = \bar{\sigma}_2 / \bar{\sigma}_1 = \sigma_2 / \sigma_1$ – коэффициент распределения напряжений,

$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 / R_y$ – напряжение на более сжатом краю пластинки;

$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 / R_y$ – напряжение на противоположном краю пластинки.

Коэффициенты редукции по ширине для пластинки, закрепленной с двух сторон, и пластинки, закрепленной с одной стороны, определяются по формулам (2.2) и (2.3) соответственно

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} + 0,18 \cdot \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,c}}{\bar{\lambda}_p - 0,6} \leq 1, \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} + 0,18 \cdot \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,c}}{\bar{\lambda}_p - 0,6} \leq 1, \quad (2.3)$$

где $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_{cr}}}$ – условная гибкость пластины в соответствии с СП 260.1325800 [2],

вычисленная по расчетному сопротивлению,

$\bar{\lambda}_{p,c} = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_{cr}}}$ – то же, с учетом фактического значения напряжений.

Эффективная ширина пластинки по отношению к полной ширине определяется по формуле

$$\bar{b}_{ef} = \frac{b_{ef}}{b} = \rho \cdot \bar{b}_c, \quad (2.4)$$

где $\bar{b}_c = b_c/b$ – относительная ширина сжатой части пластинки, рассчитываемая по формуле

$$\bar{b}_c = \begin{cases} 1/(1 - \psi), & \psi < 0; \\ 1, & \psi \geq 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

Распределение эффективной ширины выполняется в соответствии со схемами по таблицам 7.2 и 7.3 [2] (см. [115] Table 4.1, Table 4.2) в зависимости от условий закрепления и распределения напряжений.

Нетрудно заметить, что эффективная ширина прямых сжатых пластинок зависит только от условной гибкости $\bar{\lambda} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ и безразмерных значений нормальных напряжений на концах $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_2$.

§2.2.2 Редукция пластинок с продольным усилением

Очевидным способом увеличения несущей способности гибких сжатых пластинок является использование продольных элементов жесткости – одинарных и двойных краевых отгибов полок (в S-, C- и Σ -образных профилях) и промежуточных усиления в виде канавок различной формы (в стенке Σ -профиля или в полках профнастила), или ступеней (в стенках профнастила). Линия элемента продольного усиления при расчете эффективной ширины усиливаемой пластинки считается линией абсолютно жесткой опоры и, например, полка, усиленная краевым отгибом, при определении эффективной ширины рассчитывается как закрепленная с двух сторон.

В действительности элемент усиления обладает конечной жесткостью

$$K = u/\delta, \quad (2.6)$$

где u – единичная нагрузка, приложенная по центру тяжести эффективной части усиления;

δ – соответствующее перемещение в направлении, перпендикулярном оси усиливаемой пластины (см. рисунок 2.2).

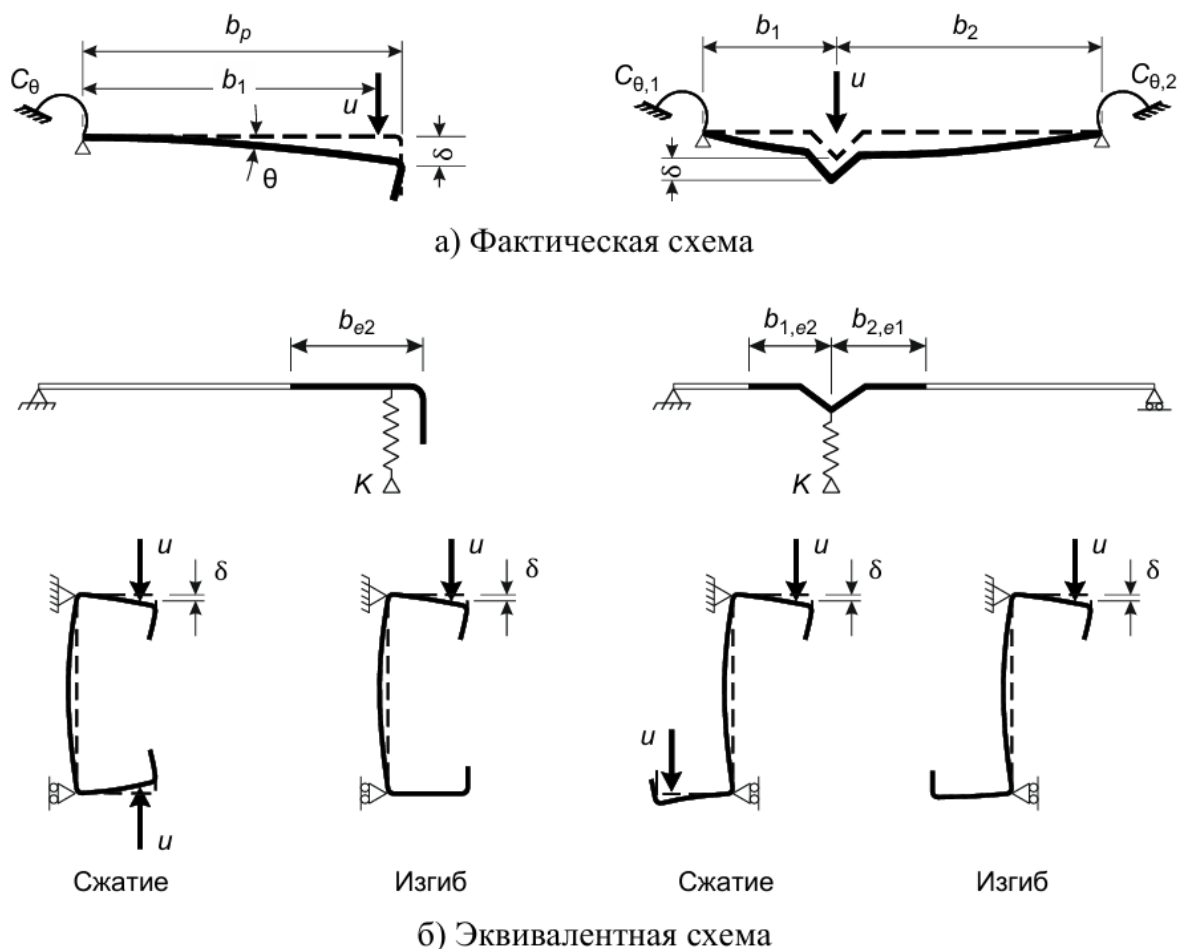


Рисунок 2.2 – Определение жесткости продольного усиления (см. рисунок 7.7 [2])

При расчете жесткости элемента усиления в работу включают эффективные части непосредственно усиления (одинарные и двойные отгибы, промежуточный «стрингер»), а также эффективные части примыкающих пластинок.

Критическое напряжение в центре тяжести элемента усиления определяется по формуле

$$\sigma_{cr} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s}, \quad (2.7)$$

где I_s – момент инерции элемента усиления относительно его центральной оси, которую проводят параллельно усиливаемой пластине;

A_s – площадь поперечного сечения усиления.

Условная гибкость элемента усиления в соответствии с нормами [2] определяется по формуле

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_{cr}}}. \quad (2.8)$$

Для учета снижения воспринимаемых элементом усиления напряжений при выгибе перпендикулярно усиливаемой пластинке определяют коэффициент редукции площади поперечного сечения

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0, & \bar{\lambda}_d \leq 0,65; \\ 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d, & 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38; \\ 0,66/\bar{\lambda}_d, & \bar{\lambda}_d \geq 1,38. \end{cases} \quad (2.9)$$

Эффективная (рабочая) толщина всех пластинок, входящих в расчетное поперечное сечение элемента усиления A_s (см. рисунок 2.2), определяется по формуле

$$t_{ef} = \chi_d \cdot t \cdot \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{com,s}}} \leq t, \quad (2.10)$$

где $\sigma_{com,s} = (\oint \sigma dA_s)/A_s$ – напряжение в центре тяжести элемента усиления.

Для расчета в безразмерных параметрах с использованием условных гибкостей пластин можно определить коэффициент редукции по толщине с учетом фактического уровня напряжений

$$\chi_{d,c} = \chi_d \sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_{com,s}}} \leq 1, \quad (2.11)$$

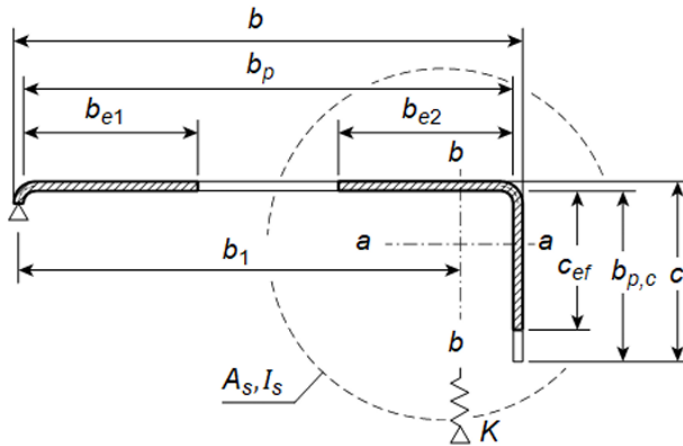
где $\bar{\sigma}_{com,s} = (\oint \bar{\sigma} \cdot dA_s)/A_s$ – безразмерное напряжение в центре тяжести элемента усиления.

Нетрудно заметить, что коэффициент редукции продольного элемента усиления зависит от распределения напряжений и критического напряжения в безразмерном виде. Выясним, какие параметры влияют на критическое напряжение краевых отгибов и промежуточных канавок, для которых нормами предусмотрены приближенные аналитические формулы расчета жесткости.

§2.2.3 Редукция пластинок с краевым отгибом

Расчетное поперечное сечение A_s одинарного краевого отгиба состоит из эффективных частей собственно отгиба и усиливаемой пластинки (см. рисунок 2.3а).

а)



б)

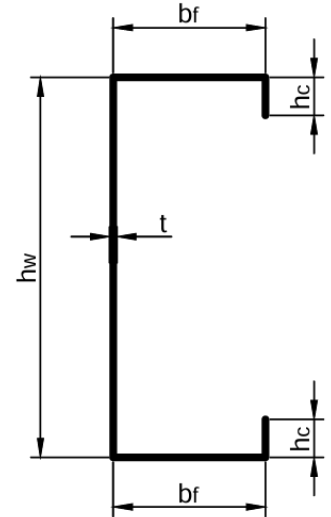


Рисунок 2.3 – Расчетная схема пластинки с краевым отгибом: а) размеры элементов рассматриваемого усиления (см. рис. 7.8а [2]), б) размеры поперечного сечения С-профиля без учета закруглений.

Запишем нормативную формулу определения жесткости краевого отгиба

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 h_w k_f b_1 b_2}, \quad (2.12)$$

где b_1, b_2 – расстояние от стенки, соединяющей пояса, до центра тяжести рассматриваемого элемента усиления и элемента усиления на противоположном поясе соответственно (см. рисунок 2.3а);

h_w – высота стенки, соединяющей пояса (см. рисунок 2.3б);

$k_f = A_{s2}/A_{s1}$ – коэффициент учета сжимающего усилия в противоположном поясе, принимаемый в случае растяжения противоположного пояса $k_f = 0$;

A_{s1}, A_{s2} – площади поперечных сечений элементов усиления рассматриваемого пояса и противоположного пояса соответственно.

Жесткость краевого отгиба по (2.12) зависит от формы сечения, которую при расчете без учета закруглений, что допускается действующими нормами [2], будем определять безразмерными параметрами

$$\alpha_f = \frac{\bar{\lambda}_f}{\bar{\lambda}_w} = \frac{b_f}{h_w}, \quad (2.13)$$

$$\alpha_c = \frac{\bar{\lambda}_c}{\bar{\lambda}_f} = \frac{h_c}{b_f}, \quad (2.14)$$

где $\bar{\lambda}_f = \frac{b_f}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$, $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$, $\bar{\lambda}_c = \frac{h_c}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – условная гибкость полки, стенки и отгиба в соответствии с СП 16.13330 [1];

b_f , h_w , h_c – ширина пояса, высота стенки и высота отгиба;

t – толщина профиля.

Распределение напряжений определяется их значениями в трех точках, не лежащих на одной прямой, и при расчете удобно задаваться значениями в начальной ($\bar{\sigma}_s$) и конечной ($\bar{\sigma}_e$) точках полки, а также на конце отгиба ($\bar{\sigma}_c$) (см. рисунок 2.4).

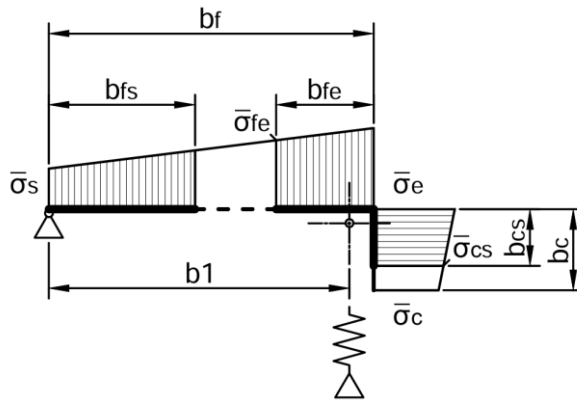


Рисунок 2.4 – Размеры эффективного сечения полки с отгибом

Относительные значения эффективной ширины полки в начале $\bar{b}_{fs} = b_{fs}/b_f$ и в конце $\bar{b}_{fe} = b_{fe}/b_f$, а также относительное значение эффективной ширины отгиба $\bar{b}_{cs} = b_{cs}/b_c$ определяем расчетом по формуле (2.4).

Относительное расстояние от стенки до центра тяжести элемента усиления определяем по формуле

$$\bar{b}_1 = \frac{b_1}{b_f} = 1 - \frac{\bar{b}_{fe}^2}{2 \cdot \bar{A}_{s1}}, \quad (2.15)$$

где $\bar{A}_{s1} = A_s / (t \cdot b_f) = \bar{b}_{fe} + \alpha_c \bar{b}_{cs}$ – относительная площадь элемента усиления.

Напряжение в центре тяжести элемента усиления определяем по формуле

$$\bar{\sigma}_{com1} = \frac{\bar{b}_{fe}(\bar{\sigma}_{fe} + \bar{\sigma}_e) + \alpha_c \bar{b}_{cs}(\bar{\sigma}_{cs} + \bar{\sigma}_e)}{2\bar{A}_{s1}}, \quad (2.16)$$

где $\bar{\sigma}_{fe} = \bar{\sigma}_e + (\bar{\sigma}_s - \bar{\sigma}_e)\bar{b}_{fe}$ – напряжение в точке полки на расстоянии b_{fe} от отгиба;

$\bar{\sigma}_{cs} = \bar{\sigma}_e + (\bar{\sigma}_c - \bar{\sigma}_e)\bar{b}_{cs}$ – напряжение в точке отгиба на расстоянии b_{cs} от полки.

Аналогично определяем $\bar{A}_{s2}$ и $\bar{\sigma}_{com2}$ для отгиба противоположной полки.

Подставляя в (2.8) критические напряжения по формуле (2.7), рассчитанные с использованием жесткости (2.12) и геометрических характеристик, выраженных аналитически через размеры b_{fe} и b_{cs} , а также с учетом (2.15), получим формулу для определения гибкости отгиба в безразмерных параметрах

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\bar{\lambda}_f} \cdot \left(\frac{E}{12R_y(1 - \nu^2)} \cdot \frac{\alpha_c^3 \alpha_f \bar{b}_{cs}^3 (4\bar{b}_{fe} + \alpha_c \bar{b}_{cs})}{\bar{b}_1 (\bar{b}_{fe} + \alpha_c \bar{b}_{cs})^3 (\alpha_f \bar{b}_1^2 + \bar{b}_1 + 0,5k_f \bar{b}_2)} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.17)$$

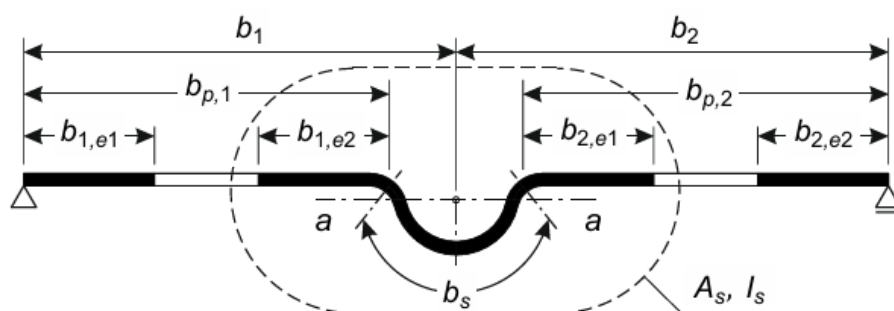
где $k_f = \bar{A}_{s2} / \bar{A}_{s1}$ – коэффициент учета сжатия противоположной полки, принимаемый $k_f = 0$ при $\bar{\sigma}_{com2} < 0$.

Коэффициенты χ_d и $\chi_{d,c}$ определяем по формулам (2.9) и (2.11) соответственно. Заметим, что условная гибкость краевого отгиба $\bar{\lambda}_d$ зависит от отношения R_y/E , поэтому профили с одинаковыми значениями условной гибкости отдельных элементов (полки, стенки, отгиба), изготовленные из сталей различных марок, имеют разные значения $\bar{\lambda}_d$.

§2.2.4 Редукция пластинок с промежуточным усилением

Расчетное поперечное сечение A_s промежуточного элемента жесткости состоит из сечения собственно элемента жесткости и эффективных частей примыкающих к нему с двух сторон частей усиливаемой пластинки (см. рисунок 2.5а).

а)



б)

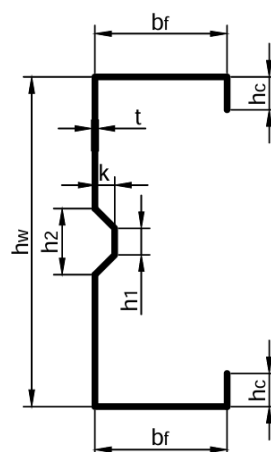


Рисунок 2.5 – Расчетная схема пластинки с промежуточным элементом усиления: а) размеры элементов усиления в общем виде (см. рисунок 7.9 [2]), б) размеры поперечного сечения Σ -профиля без учета закруглений.

Запишем нормативную формулу определения жесткости усиления

$$K = \frac{(b_1 + b_2)Et^3}{4b_1^2b_2^2(1 - \nu^2)}, \quad (2.18)$$

где b_1, b_2 – расстояния от центра тяжести элемента жесткости до закреплений усиливаемой пластины (см. рисунок 2.5а).

Жесткость промежуточного элемента усиления по (2.18) зависит от формы усиления, которую при расчете трапецевидной канавки без учета закруглений, что допускается действующими нормами [2], будем определять безразмерными параметрами

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{h_2}, \quad (2.19)$$

$$\alpha_k = \frac{k}{h_2}, \quad (2.20)$$

$$\alpha_2 = \frac{h_2}{h_w}. \quad (2.21)$$

где h_1, h_2, k – размеры элемента усиления (см. рисунок 2.5б).

Распределение напряжений определяется их значениями в трех точках, не лежащих на одной прямой, но для дальнейшего расчета удобно вычислить напряжения в шести характерных точках (см. рисунок 2.6).

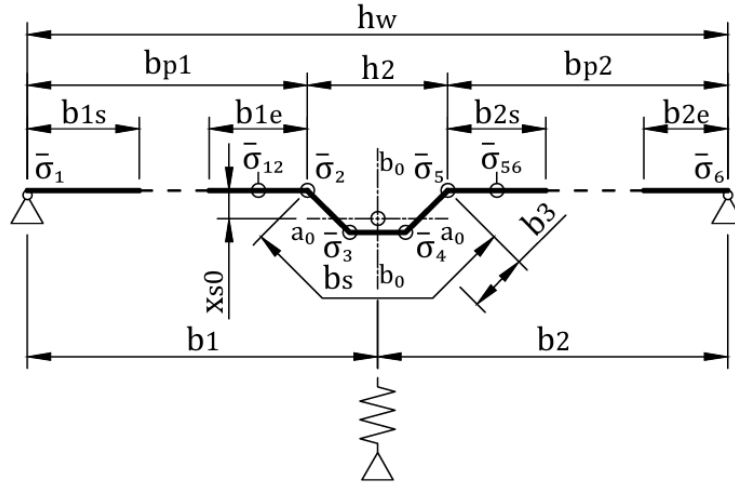


Рисунок 2.6 – Размеры эффективного сечения стенки с усилением

Относительные значения эффективной ширины прямых пластинок стенки $\bar{b}_{1s} = b_{1s}/b_{p1}$, $\bar{b}_{1e} = b_{1e}/b_{p1}$, $\bar{b}_{2s} = b_{2s}/b_{p2}$, $\bar{b}_{2e} = b_{2e}/b_{p2}$ определяем расчетом по формуле (2.4).

Подставляя в (2.8) критические напряжения по формуле (2.7), рассчитанные с использованием жесткости (2.18) и геометрических характеристик, выраженных аналитически через параметры α_{s1} , α_{s2} , α_k , получим формулу для определения гибкости промежуточного элемента жесткости в безразмерных параметрах

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\bar{\lambda}_w} \left(\frac{E}{R_y(1-\nu^2)} \times \frac{(\bar{b}_1 + \bar{b}_2) [\bar{I}_{s0}(\alpha_s + \bar{b}_{1e} + \bar{b}_{2s}) + \alpha_s \bar{x}_{s0}^2(\bar{b}_{1e} + \bar{b}_{2s})]}{\bar{b}_1^2 \cdot \bar{b}_2^2 \cdot (\alpha_s + \bar{b}_{1e} + \bar{b}_{2s})^3} \right)^{-\frac{1}{4}}, \quad (2.22)$$

где $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – условная гибкость стенки в соответствии с СП 16.13330 [1];

$\bar{b}_1 = b_1/h_w$, $\bar{b}_2 = b_2/h_w$ – относительные расстояния от концов стенки до центра тяжести элемента жесткости;

$\alpha_s = b_s/h_w = \alpha_2(\alpha_1 + 2\alpha_3)$ – параметр формы, характеризующий площадь элемента жесткости, где b_s – длина контура элемента жесткости;

$\alpha_3 = b_3/h_2 = \sqrt{\alpha_k^2 + 0,25 \cdot (1 - \alpha_1)^2}$ – параметр формы, характеризующий длину боковой стороны трапеции b_3 ;

$\bar{x}_{s0} = x_{s0}/h_w = \alpha_2 \alpha_k \frac{\alpha_1 + \alpha_3}{\alpha_1 + 2\alpha_3}$ – координата центра тяжести элемента жесткости без учета примыкающих участков усиливаемой пластинки в безразмерном виде (по отношению к высоте стенки);

$\bar{I}_{s0} = I_{s0}/(t \cdot h_w^3) = \frac{\alpha_3 \alpha_k^2 \alpha_2^3 (2\alpha_1 + \alpha_3)}{3\alpha_1 + 6\alpha_3}$ – момент инерции элемента жесткости без учета примыкающих участков относительно центральной оси элемента жесткости «а0-а0», проведенной параллельно усиливаемой пластинке, в безразмерном виде.

Формула (2.22) справедлива для промежуточных элементов жесткости другой формы, геометрические характеристики которых выражены безразмерными параметрами α_s , $\bar{x}_{s0}$, $\bar{I}_{s0}$.

Среднее напряжение в промежуточном элементе жесткости с учетом примыкающих участков эффективной ширины усиливаемой пластины определяем по формуле

$$\bar{\sigma}_{com} = \frac{\bar{\sigma}_{12} \tilde{b}_{1e} + \alpha_2 (\alpha_1 \bar{\sigma}_{34} + \alpha_3 (\bar{\sigma}_{23} + \bar{\sigma}_{45})) + \bar{\sigma}_{56} \tilde{b}_{2s}}{\tilde{b}_{1e} + \alpha_s + \tilde{b}_{2s}}, \quad (2.23)$$

где $\tilde{b}_{1e} = \bar{b}_{1e} \frac{b_{p1}}{h_w}$, $\tilde{b}_{2s} = \bar{b}_{2s} \frac{b_{p2}}{h_w}$ – ширина эффективных частей примыкающих пластин, отнесенная к высоте стенки;

$\bar{\sigma}_{12} = \bar{\sigma}_2 + (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2) \cdot 0,5 \cdot \bar{b}_{1e}$ – среднее напряжение в эффективной части $\bar{b}_{1e}$ примыкающей к элементу жесткости пластинки;

$\bar{\sigma}_{56} = \bar{\sigma}_5 + (\bar{\sigma}_6 - \bar{\sigma}_5) \cdot 0,5 \cdot \bar{b}_{2s}$ – то же, для эффективной части $\bar{b}_{2s}$;

$\bar{\sigma}_{23} = (\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)/2$, $\bar{\sigma}_{34} = (\bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_4)/2$, $\bar{\sigma}_{45} = (\bar{\sigma}_4 + \bar{\sigma}_5)/2$ – средние напряжения в пластинках элемента жесткости.

Коэффициенты χ_d и $\chi_{d,c}$ определяем по формулам (2.9) и (2.11) соответственно. Заметим, что условная гибкость промежуточного элемента усиления $\bar{\lambda}_d$ аналогично условной гибкости краевого отгиба зависит от отношения R_y/E .

§2.3. Безразмерные параметры прочности

Запишем условие прочности по нормальным напряжениям в точке сечения с координатами (x, y) в обычном и безразмерном видах

$$\sigma_z(x, y) \leq R_y, \quad (2.24)$$

$$\bar{\sigma}_z(x, y) \leq 1, \quad (2.25)$$

где $\bar{\sigma}_z = \sigma_z/R_y$ – нормальное напряжение в безразмерном виде.

Нормальные напряжения в упругой стадии работы материала при использовании гипотезы плоских сечений определяются по формуле

$$\sigma_z(x, y) = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x, \quad (2.26)$$

где A, I_x, I_y – площадь и моменты инерции поперечного сечения;

x, y – координаты рассматриваемой точки в центральных осях сечения.

Здесь и в дальнейшем положительному значению σ_z соответствует сжатие, положительным направлениям действующих усилий – сжатие в I квадранте (см. рисунок 2.7).

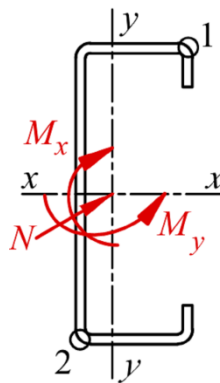


Рисунок 2.7 – Положительные направления усилий и обозначения главных осей

Запишем условие прочности по нормальным напряжениям в наиболее напряженной точке сечения без учета редукции

$$\sigma_z^* = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y^* + \frac{M_y}{I_y} x^* \leq R_y, \quad (2.27)$$

где x^*, y^* – координаты наиболее нагруженной точки сечения.

Перепишем условие прочности, разделив обе части неравенства на расчетное сопротивление

$$\bar{\sigma}^* = \frac{N}{AR_y} + \frac{M_x}{W_x R_y} + \frac{M_y}{W_y R_y} \leq 1, \quad (2.28)$$

где $\bar{\sigma}^* = \sigma^*/R_y$ – напряжение в наиболее нагруженной точке;

$W_x = I_x/y^*, W_y = I_y/x^*$ – моменты сопротивления сечения.

Для удобства расчетов и анализа результатов вводим безразмерные параметры усилий, с учетом которых условие прочности приобретает вид

$$\bar{\sigma}^* = \bar{N} + \bar{M}_x + \bar{M}_y \leq 1, \quad (2.29)$$

где $\bar{N} = \frac{N}{AR_y}$ – безразмерная продольная сила;

$\bar{M}_x = \frac{M_x}{W_x R_y}$ и $\bar{M}_y = \frac{M_y}{W_y R_y}$ – безразмерные изгибающие моменты.

§2.3.1 Коэффициенты редукции предельных усилий элементов ЛСТК

Расчет элементов ЛСТК производят по редуцированным геометрическим характеристикам, с использованием которых условие прочности имеет вид

$$\sigma_z(x_1, y_1) = \frac{N}{A_{ef}} + \frac{M_x}{I_{x,ef}} y_1 + \frac{M_y}{I_{y,ef}} x_1 \leq R_y, \quad (2.30)$$

где A_{ef} – редуцированная площадь поперечного сечения;

$I_{x,ef}, I_{y,ef}$ – редуцированные моменты инерции поперечного сечения;

x_1, y_1 – координаты точки в центральных осях редуцированного сечения.

Учитывая, что значения редуцированных геометрических характеристик зависят от распределения напряжений, расчет прочности элемента ЛСТК по фактическому распределению напряжений выполняется итерационно с определением нового положения центра и угла поворота главных осей редуцированного сечения на каждой итерации и на практике выполняется с использованием специализированного программного обеспечения.

Запишем условие прочности (2.30) для наиболее нагруженной точки сечения с координатами (x_1^*, y_1^*) , разделив обе части неравенства на R_y

$$\bar{\sigma}_z^* = \frac{N}{A_{ef}R_y} + \frac{M_x}{W_{x,ef}R_y} + \frac{M_y}{W_{y,ef}R_y} \leq 1, \quad (2.31)$$

где $W_{x,ef} = I_{x,ef}/y_1^*$, $W_{y,ef} = I_{y,ef}/x_1^*$ – редуцированные моменты сопротивления сечения.

Заметим, что геометрические характеристики редуцированного сечения не превышают геометрических характеристик полного сечения, а условие (2.31) может быть записано в виде

$$\bar{\sigma}_z^* = \frac{N}{r_z A R_y} + \frac{M_x}{r_x W_x R_y} + \frac{M_y}{r_y W_y R_y} \leq 1, \quad (2.32)$$

где $r_z = A_{ef}/A$ – коэффициент редукции предельной продольной силы N_u ;

$r_x = W_{x,ef}/W_x$ – то же, для предельного изгибающего момента $M_{x,u}$;

$r_y = W_{y,ef}/W_y$ – то же, для предельного изгибающего момента $M_{y,u}$.

При этом условие прочности (2.32) справедливо, если коэффициенты редукции определены для одного и того же редуцированного сечения, соответствующего фактическому распределению напряжений.

Запишем условие прочности (2.32) в безразмерном виде

$$\bar{\sigma}_z^* = \frac{\bar{N}}{r_z} + \frac{\bar{M}_x}{r_x} + \frac{\bar{M}_y}{r_y} \leq 1. \quad (2.33)$$

Расчет прочности элементов ЛСТК в соответствии с действующими нормами [2] может быть выполнен как по фактическому распределению напряжений, так и по редуцированным геометрическим характеристикам, которые рассчитаны при раздельном действии усилий.

Коэффициенты редукции r_z^* , r_x^* , r_y^* , соответствующие раздельному действию усилий, определяются по соответствующим предельным состояниям

$$\bar{\sigma}^* = \bar{N}_u/r_z^* = 1, \quad (2.34)$$

$$\bar{\sigma}^* = \bar{M}_{x,u}/r_x^* = 1, \quad (2.35)$$

$$\bar{\sigma}^* = \bar{M}_{y,u}/r_y^* = 1. \quad (2.36)$$

Выразим коэффициенты редукции

$$r_z^* = \bar{N}_u = A_{ef}^*/A, \quad (2.37)$$

$$r_x^* = \bar{M}_{x,u} = W_{x,ef}^*/W_x, \quad (2.38)$$

$$r_y^* = \bar{M}_{y,u} = W_{y,ef}^*/W_y, \quad (2.39)$$

где A_{ef}^* , $W_{x,ef}^*$, $W_{y,ef}^*$ – редуцированные геометрические характеристики из расчетов на раздельное действие усилий N , M_x , M_y соответственно.

Коэффициент использования прочности в поперечном сечении элемента ЛСТК при использовании геометрических характеристик, полученных при раздельном действии усилий, таким образом, имеет вид

$$K_u = \frac{\bar{N}}{r_z^*} + \frac{\bar{M}_x}{r_x^*} + \frac{\bar{M}_y}{r_y^*} \leq 1. \quad (2.40)$$

Как видно по (2.40), оценку прочности при действии N , M_x , M_y допускается выполнять по линейной комбинации частных проверок прочности при раздельном действии усилий. Это означает, что комбинируются и схемы редукции, соответствующие раздельному действию усилий, в то время как схема редукции, полученная по фактическому распределению напряжений, может очень сильно отличаться от каждой из комбинируемых схем (см. рисунок 2.8). По этой причине формула (2.40) представляет собой уже не проверку по напряжениям в наиболее нагруженной точке, а только лишь приближенную оценку прочности, в связи с чем в левой части обозначение « $\bar{\sigma}^*$ » (см. (2.33)) заменено на « K_u ».

В дальнейшем будем использовать обозначения r_x , r_y , r_z вместо r_x^* , r_y^* , r_z^* , подразумевая, что коэффициенты редукции определяются при раздельном действии усилий. Тогда нормативная проверка прочности элементов ЛСТК может быть записана

$$K_u = \frac{N}{r_z A_g R_y} + \frac{M_x}{r_x W_{x,g} R_y} + \frac{M_y}{r_y W_{y,g} R_y} \leq 1, \quad (2.41)$$

где $r_z = A_{ef}/A_g$, $r_x = W_{x,ef}/W_{x,g}$, $r_y = W_{y,ef}/W_{y,g}$ – коэффициенты редукции;

A_g , $W_{x,g}$, $W_{y,g}$ – геометрические характеристики полного сечения;

A_{ef} , $W_{x,ef}$, $W_{y,ef}$ – редуцированные геометрические характеристики, полученные расчетом на раздельное действие N , M_x и M_y соответственно.

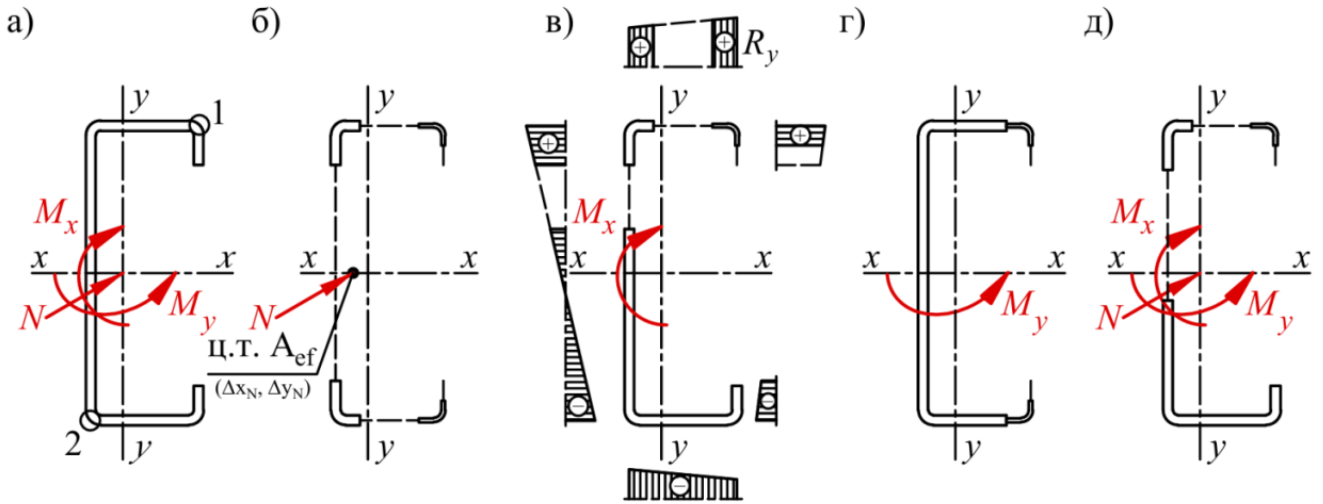


Рисунок 2.8 – Полное и редуцированные сечения С-профиля: а) обозначение главных осей полного сечения; б) при действии N ; в) при действии M_x ; г) при действии M_y ; д) при действии N, M_x, M_y .

Предельное сжимающее усилие N_u и соответствующая схема редукции сечения определяются в соответствии с [2] при равномерном распределении сжимающих напряжений $\sigma_z = R_y$ в поперечном сечении. В несимметричных сечениях при этом возникает смещение центра тяжести редуцированного сечения, которое учитывается дополнительными изгибающими моментами, с учетом которых проверка прочности приобретает вид

$$K_u = \frac{N}{r_z A_g R_y} + \frac{M_x + \Delta M_x}{r_x W_{x,g} R_y} + \frac{M_y + \Delta M_y}{r_y W_{y,g} R_y} \leq 1, \quad (2.42)$$

где $\Delta M_x = -N \cdot \Delta y_N$, $\Delta M_y = -N \cdot \Delta x_N$ – дополнительные изгибающие моменты от действия продольной силы;

$\Delta x_N, \Delta y_N$ – координаты центра тяжести редуцированного сечения при действии N_u .

Формула (2.42) является аналогом формулы (8.33) действующих норм [2], но записана с использованием коэффициентов редукции.

§2.3.2 Численно-аналитический метод расчета коэффициентов редукции

Запишем формулу для определения коэффициента редукции в общем виде

$$r = \frac{F_u}{F_{u,g}} = \frac{G_{ef}}{G_g}, \quad (2.43)$$

где F_u – предельное значение усилия ($N_u = A_{ef}R_y$, $M_{x,u} = W_{x,ef}R_y$, $M_{y,u} = W_{y,ef}R_y$), воспринимаемое поперечным сечением элемента ЛСТК;
 $F_{u,g}$ – соответствующее предельное значение усилия, воспринимаемое полным сечением (без учета редукции);

G_{ef} и G_g – характерные геометрические характеристики редуцированного и полного поперечного сечения соответственно.

Для определения коэффициентов редукции геометрические характеристики G_{ef} и G_g могут быть рассчитаны численно-аналитически.

Рассмотрим использование численно-аналитического метода расчета коэффициентов редукции на примере спаренных С-профилей. Коэффициент редукции при центральном сжатии без учета радиусовгиба определяется по формуле (расчетная схема показана на рисунке 2.9)

$$r_z = \frac{r_{z,w} + 2\alpha_f \cdot (r_{z,f} + \alpha_c \cdot r_{z,c})}{1 + 2\alpha_f \cdot (1 + \alpha_c)}, \quad (2.44)$$

где $r_{z,w} = h_{w,ef}/h_w = \bar{h}_{w,ef}$ – коэффициент редукции при сжатии стенки, определяемый по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_w$ и $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = 1$;

$r_{z,f} = (b_{f,s} + \chi \cdot b_{f,e})/b_f = \bar{b}_{f,s} + \chi \cdot \bar{b}_{f,e}$ – коэффициент редукции при сжатии полки;

$\bar{b}_{f,s}$ и $\bar{b}_{f,e}$ – относительная эффективная ширина полки, определяемая расчетом по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_f$ и $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = 1$;

$r_{z,c} = \chi \cdot h_{c,s}/h_c = \chi \cdot \bar{h}_{c,s}$ – коэффициент редукции при сжатии отгиба;

$\bar{h}_{c,s}$ – относительная эффективная ширина отгиба, определяемая по формуле (2.4) для $\bar{\lambda}_c$ с учетом значения k_σ (см. формулу (2.1)), определяемого по формулам (7.29)-(7.30) [2];

χ – коэффициент редукции по толщине для отгиба, определяемый по формуле (2.9) с учетом $\bar{\lambda}_d$, определяемого по формуле (2.17) при напряжениях $\bar{\sigma}_s = 1, \bar{\sigma}_e = 1, \bar{\sigma}_c = 1$;

$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \bar{\lambda}_f = \frac{b_f}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \bar{\lambda}_c = \frac{h_c}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – условные гибкости;

$\alpha_f = b_f/h_w = \bar{\lambda}_f/\bar{\lambda}_w$ – коэффициент формы сечения;

$\alpha_c = h_c/b_f = \bar{\lambda}_c/\bar{\lambda}_f$ – коэффициент формы отгиба.

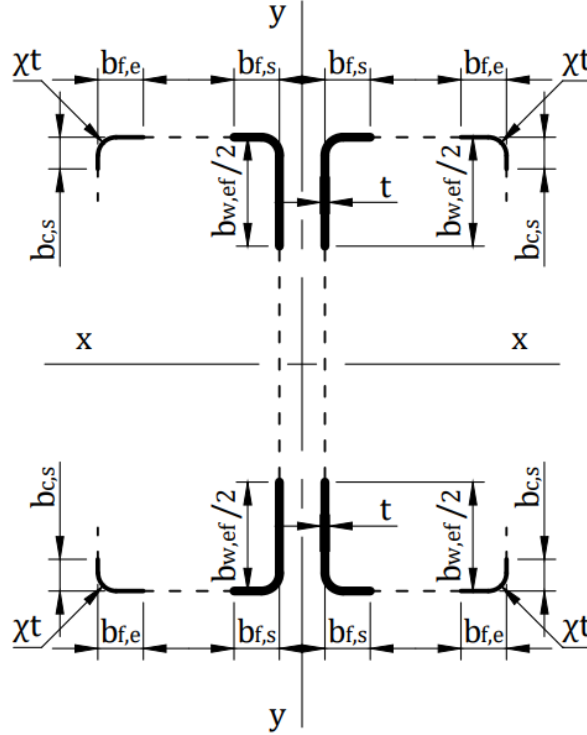


Рисунок 2.9 – Схема к определению коэффициента r_z

Коэффициент редукции r_x при действии изгибающего момента M_x может быть рассчитан по формуле (расчетная схема показана на рисунке 2.10)

$$r_x = \frac{K_{yc} + K_f + K_w}{(\bar{y}_c + 1) \cdot (8\alpha_f^3 \alpha_c^3 - 12\alpha_f^2 \alpha_c^2 + 6\alpha_f \alpha_c + 6\alpha_f + 1)}, \quad (2.45)$$

где K_{yc} – коэффициент учета смещения центра тяжести, определяемый по формуле (2.46);

K_f – коэффициент учета редукции полки, определяемый по формуле (2.47);

K_w – коэффициент учета редукции стенки, определяемый по формуле (2.48);

$\bar{y}_c = -2 \Delta y/h_w$ – относительное смещение центра тяжести редуцированного сечения, определяемое по формуле (2.49).

Коэффициенты для расчета r_x и относительное смещение центра тяжести определяются по формулам

$$\begin{aligned}
K_{y,c} = & 6\bar{y}_c(\bar{b}_{w,t} - \bar{b}_{w,b}) \left(1 - (\bar{b}_{w,t} + \bar{b}_{w,b})\right) - \\
& -6\bar{y}_c\alpha_f \left(1 - r_{x,f} + \alpha_c \left(1 - \chi\bar{b}_{c,s} - \alpha_f\alpha_c(1 - \chi\bar{b}_{c,s}^2)\right)\right) \\
& +3\bar{y}_c^2 \left(\bar{b}_{w,b} + \bar{b}_{w,t} + \alpha_f \left(1 + r_{x,f} + \alpha_c(1 + \chi\bar{b}_{c,s})\right)\right),
\end{aligned} \tag{2.46}$$

$$\begin{aligned}
K_f = & 3\alpha_f[1 + r_{x,f} + \alpha_c(1 + \chi\bar{b}_{c,s})] - \\
& -6\alpha_f^2\alpha_c^2 \left(1 + \chi\bar{b}_{c,s}^2 - \frac{2}{3}\alpha_f\alpha_c(1 + \chi\bar{b}_{c,s}^3)\right),
\end{aligned} \tag{2.47}$$

$$K_w = 4(\bar{b}_{w,b}^3 + \bar{b}_{w,t}^3) - 6(\bar{b}_{w,b}^2 + \bar{b}_{w,t}^2) + 3(\bar{b}_{w,b} + \bar{b}_{w,t}), \tag{2.48}$$

$$\begin{aligned}
\bar{y}_c = & \left[\bar{b}_{w,b} + \bar{b}_{w,t} + \alpha_f \left(1 + \bar{b}_{f,s} + \chi\bar{b}_{f,e} + \alpha_c(1 + \chi\bar{b}_{c,s})\right)\right]^{-1} \times \\
& \times \left[\begin{aligned} & \bar{b}_{w,b}(1 - \bar{b}_{w,b}) - \bar{b}_{w,t}(1 - \bar{b}_{w,t}) - \alpha_f^2\alpha_c^2(1 - \chi\bar{b}_{c,s}^2) + \\ & + \alpha_f \left(1 - \bar{b}_{f,s} - \chi\bar{b}_{f,e} + \alpha_c(1 - \chi\bar{b}_{c,s})\right) \end{aligned} \right],
\end{aligned} \tag{2.49}$$

где $\bar{b}_{w,b}$ и $\bar{b}_{w,t}$ – относительная эффективная ширина стенки снизу и сверху, определяемая расчетом по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_w$ и $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_{min}$ и $\bar{\sigma}_2 = 1$;

$\bar{b}_{f,s}$ и $\bar{b}_{f,e}$ – относительная эффективная ширина полки в начале и конце, определяемая расчетом по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_f$ и $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = 1$;

$\bar{b}_{c,s}$ – относительная эффективная ширина отгиба, определяемая по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_c$ с учетом значения k_σ (см. формулу (2.1)), определяемого по формулам (7.29)-(7.30) [2];

$r_{x,f} = (b_{f,s} + \chi \cdot b_{f,e})/b_f = \bar{b}_{f,s} + \chi \cdot \bar{b}_{f,e}$ – коэффициент редукции полки;

χ – коэффициент редукции по толщине для отгиба, определяемый по формуле (2.9) с учетом $\bar{\lambda}_d$, определяемого по формуле (2.17) при напряжениях

$\bar{\sigma}_s = 1, \bar{\sigma}_e = 1, \bar{\sigma}_c = 1 - 2\alpha_f\alpha_c$;

$\bar{\sigma}_{min} = \frac{\bar{y}_c - 1}{\bar{y}_c + 1}$ – безразмерное напряжение в растянутой полке.

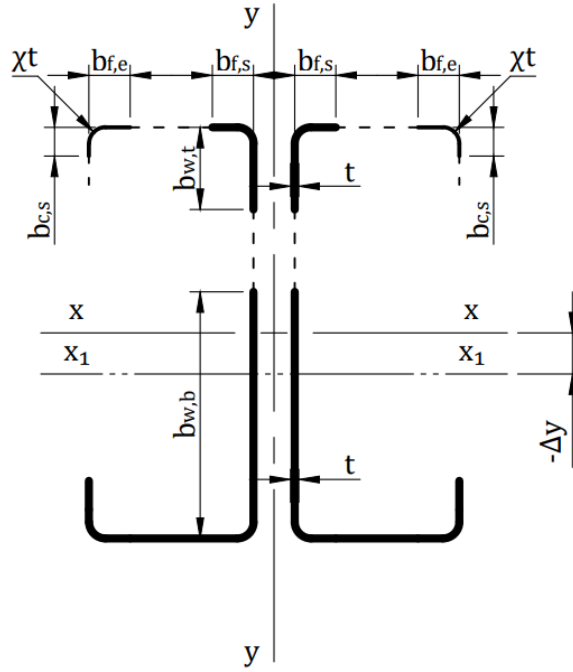


Рисунок 2.10 – Схема к определению коэффициента r_x

Коэффициент редукции r_y при действии изгибающего момента M_y может быть рассчитан по формуле (расчетная схема показана на рисунке 2.11)

$$r_y = \frac{3\bar{x}_c^2 \cdot \bar{b}_{w,ef}}{2\alpha_f(\bar{x}_c + 1)(3\alpha_c + 1)} + [2(\bar{x}_c + 1)(3\alpha_c + 1)]^{-1} \times \left[2 + \bar{b}_{f,s}^3 - \chi(1 - \bar{b}_{f,e})^3 - 1 + \chi + \right. \\ \left. + 3\alpha_c \left(1 + \chi\bar{b}_{c,s} + \bar{x}_c(\bar{x}_c + \chi\bar{b}_{c,s}(2 + \bar{x}_c) - 2) \right) + \right. \\ \left. + 3\bar{x}_c \left(\bar{b}_{f,s}^2 - \chi(1 - \bar{b}_{f,e})^2 + \chi - 1 + \bar{x}_c(1 + \bar{b}_{f,s} + \chi\bar{b}_{f,e}) \right) \right], \quad (2.50)$$

где $\bar{b}_{w,ef} = b_{w,ef}/h_w$ – относительная эффективная ширина стенки, определяемая расчетом по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_w$ при $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_w$;

$\bar{b}_{f,s}$ и $\bar{b}_{f,e}$ – относительная эффективная ширина полки в начале и конце, определяемая расчетом по формуле (2.4) для гибкости $\bar{\lambda}_f$ при $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_w$ и $\bar{\sigma}_2 = 1$;

$\bar{b}_{c,s}$ – относительная эффективная ширина отгиба, определяемая по формуле (2.4) для $\bar{\lambda}_c$ с учетом значения k_σ (см. формулу (2.1)), определяемого по формулам (7.29)-(7.30) [2];

пор, пока изменение координат смещения на двух последовательных итерациях превышает принятый порог точности.

По формулам (2.44), (2.45), (2.50) видно, что зависимость коэффициентов редукиции от параметров формы поперечного сечения очень сложная.

При расчете коэффициентов редукиции спаренных Σ -профилей влияние оказывают также параметры формы усиления стенки: α_{s1} , α_{s2} , α_k (см. формулы (2.19)-(2.21)). На рисунке пунктирной линией показана полученная аналитически зависимость коэффициента редукиции r_x от гибкости стенки $\bar{\lambda}_w$ для спаренного Σ -профиля при постоянном значении параметров формы сечения.

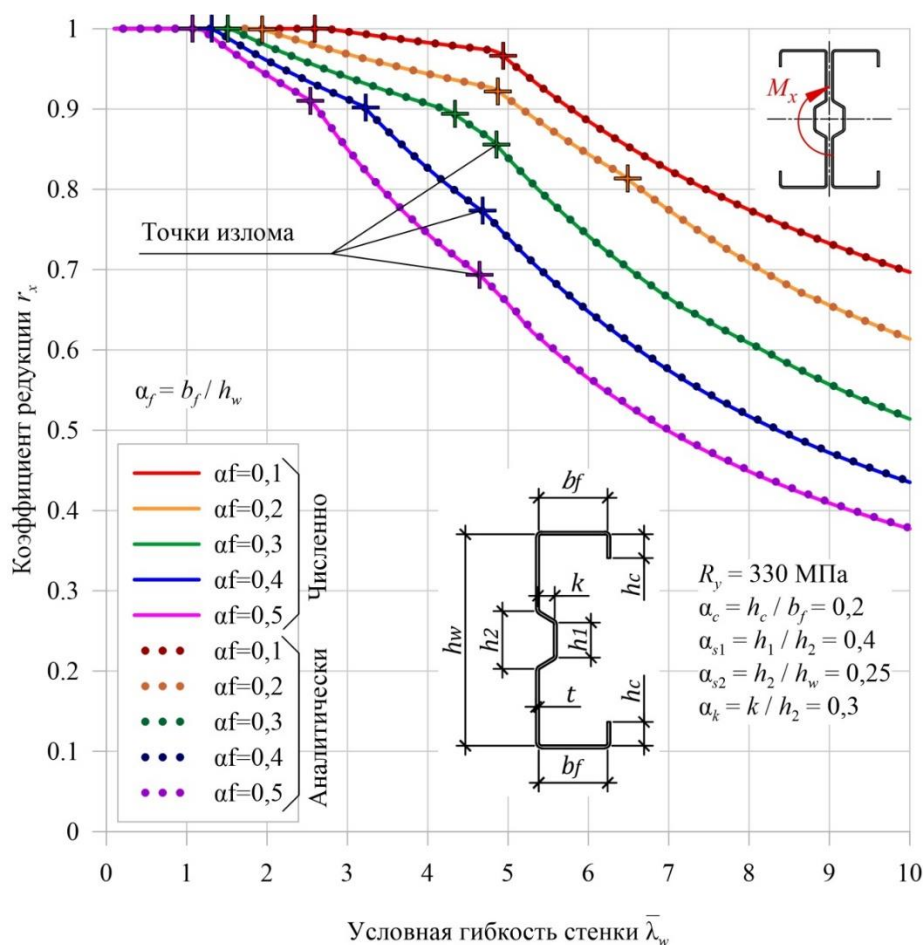


Рисунок 2.12 – Коэффициент редукиции r_x спаренного Σ -профиля

На графиках отмечены точки излома функции $r_x(\bar{\lambda}_w)$, которые соответствуют возникновению новых участков редукиции пластин. Сложность зависимостей r_x , r_y и r_z от входных параметров, а также большой диапазон возможных значений не позволяет подобрать надежные и удобные в практическом расчете ап-

проксимирующие зависимости. Внедрение в практику проектирования численно-аналитического расчета по формулам (2.44), (2.45), (2.50) с итерационным уточнением центра тяжести также представляется затруднительным: для этого необходимо составить аналогичные аналитические зависимости для всего многообразия форм поперечных сечений, при этом формулы для расчета сложных сечений, таких как Σ -профиль, оказываются настолько громоздкими, что применение их в практике проектирования не представляется возможным.

Для расчета коэффициентов редукции и для проверки прочности по редуцированному сечению, полученному с учетом фактического распределения напряжений, хорошо подходит обратный численный метод, разработанный с учетом особенностей работы сечений ЛСТК. Результаты расчета коэффициента редукции r_x для спаренного Σ -профиля обратным численным методом показаны на рисунке 2.12 сплошной линией и в точности совпадают с численно-аналитическим расчетом.

§2.4. Обратный численный метод расчета прочности элементов ЛСТК

§2.4.1 Прочность по заданному деформированному состоянию

Для расчета элементов ЛСТК применим обратный численный метод «Сечение», предложенный Белым Г.И. [28]. Метод был существенно доработан автором диссертации для учета особенностей работы элементов ЛСТК общего вида.

Зададимся произвольным распределением деформаций в сечении с учетом гипотезы плоских сечений

$$\varepsilon_z(x, y) = ax + by + c, \quad (2.52)$$

где a, b, c – произвольные действительные числа;

x, y – координаты точки сечения.

Расчет элементов ЛСТК выполняется в упругой стадии, поэтому связь нормальных напряжений σ_z и относительных деформаций ε_z линейная

$$\sigma_z(x, y) = E \cdot \varepsilon_z(x, y), \quad (2.53)$$

где E – модуль упругости стали.

Таким образом, любому деформированному состоянию в сечении $\varepsilon_z(x, y)$ соответствует напряженное состояние $\sigma_z(x, y)$, а следовательно, и конкретная эффективная (рабочая) площадь сечения A_{ef} , интегрируя нормальные напряжения по которой определяем действующие в главных осях полного сечения усилия

$$\begin{cases} N = \oint_{A_{ef}} \sigma_z(x, y) \cdot dA_{ef} = E \oint_{A_{ef}} \varepsilon_z(x, y) \cdot dA_{ef}, \\ M_x = \oint_{A_{ef}} \sigma_z(x, y) \cdot y \cdot dA_{ef} = E \oint_{A_{ef}} \varepsilon_z(x, y) \cdot y \cdot dA_{ef}, \\ M_y = \oint_{A_{ef}} \sigma_z(x, y) \cdot x \cdot dA_{ef} = E \oint_{A_{ef}} \varepsilon_z(x, y) \cdot x \cdot dA_{ef}. \end{cases} \quad (2.54)$$

Отметим, что редуцированное сечение может быть представлено набором из n пластинок с шириной b_i и постоянной по длине толщиной t_i . Пренебрегая неравномерностью распределения деформаций по толщине пластинок, можем записать

$$\oint_{A_{ef}} f(x, y) \cdot dA_{ef} = \sum_{i=1}^n b_i t_i \int_0^1 f(\bar{s}) \cdot d\bar{s}, \quad (2.55)$$

где $f(x, y)$ – подынтегральная функция, зависящая от координат в главных осях;
 $\bar{s} \in [0; 1]$ – координата вдоль осевой линии пластинки в безразмерном виде;
 $f(\bar{s})$ – подынтегральная функция, рассчитанная для осевой линии пластинки
 $x = x(\bar{s})$, $y = y(\bar{s})$.

В соответствии с действующими нормами закругления могут не учитываться при расчете редукции сечения или могут учитываться с использованием приближенных формул (7.8)–(7.11) норм [2]. В таком случае координаты срединной линии каждой прямой пластинки могут быть определены координатами начальной точки $(x_s; y_s)$ и конечной точки $(x_e; y_e)$ по формулам

$$\begin{aligned} x(\bar{s}) &= x_s + (x_e - x_s)\bar{s}, \\ y(\bar{s}) &= y_s + (y_e - y_s)\bar{s}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Тогда деформации (2.52) определяются в зависимости от координаты $\bar{s}$ по формуле

$$\begin{aligned}
\varepsilon_z(\bar{s}) &= a \cdot (x_s + (x_e - x_s)\bar{s}) + b \cdot (y_s + (y_e - y_s)\bar{s}) + c = \\
&= (ax_s + by_s + c) + ((ax_e + by_e + c) - (ax_s + by_s + c))\bar{s} = \\
&= \varepsilon_{z,s} + (\varepsilon_{z,e} - \varepsilon_{z,s})\bar{s},
\end{aligned} \tag{2.57}$$

где $\varepsilon_{z,s} = \varepsilon_z(x_s, y_s)$ – деформация в начальной точке пластинки;

$\varepsilon_{z,e} = \varepsilon_z(x_e, y_e)$ – деформация в конечной точки пластинки;

Так как все подынтегральные выражения в (2.55) с учетом (2.56) и (2.57) являются либо константами, либо линейными функциями, либо многочленами второй степени относительно $\bar{s}$, то простейшая формула Симпсона позволяет рассчитывать точные значения усилий

$$\begin{cases} N = \frac{E}{2} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z,s,i} + \varepsilon_{z,e,i}), \\ M_x = \frac{E}{6} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z,s,i} (2y_{s,i} + y_{e,i}) + \varepsilon_{z,e,i} (2y_{e,i} + y_{s,i})), \\ M_y = \frac{E}{6} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z,s,i} (2x_{s,i} + x_{e,i}) + \varepsilon_{z,e,i} (2x_{e,i} + x_{s,i})), \end{cases} \tag{2.58}$$

где $x_{s,i}, y_{s,i}$ – координаты начальной точки i -ой пластинки;

$x_{e,i}, y_{e,i}$ – координаты конечной точки i -ой пластинки;

$\varepsilon_{z,s,i} = \varepsilon_z(x_{s,i}, y_{s,i})$ и $\varepsilon_{z,e,i} = \varepsilon_z(x_{e,i}, y_{e,i})$ – деформации в начальной и в конечной точке i -ой пластинки.

Использование формул (2.58) позволяет рассчитывать усилия в редуцированном сечении поперечном сечении намного эффективнее, чем при разбиении поперечного сечения на волокна при использовании метода «Сечение» по [28] как с точки зрения количества операций, так и с точки зрения необходимой для вычисления памяти. Для расчета пластинок криволинейной формы (например, в местахгиба) интегрирование по методу Симпсона можно заменить интегрированием по методу Гаусса, при этом для получения приемлемой точности достаточно использовать 4 узла по ширине пластинки.

Эффективная (рабочая) площадь поперечного сечения A_{ef} нелинейно зависит от параметров a, b, c распределения деформаций (2.52), поэтому функции усилий (2.54) – также нелинейные относительно a, b, c .

Критерием прочности в поперечном сечении элемента ЛСТК является достижение расчетного сопротивления по пределу текучести в наиболее напряженном волокне

$$\sigma_{z,max} = R_y. \quad (2.59)$$

Деформация в этой точке равна

$$\varepsilon_{z,max} = \varepsilon_y = R_y/E. \quad (2.60)$$

Для исследования предельных состояний по прочности в поперечных сечениях элементов ЛСТК, имеющих две оси симметрии, запишем распределение деформаций в виде

$$\varepsilon_z(x, y) = \varepsilon_{z,max} \cdot \left[k_N + (1 - |k_N|) \left(k_{M_x} \cdot \frac{y}{y^*} + (1 - k_{M_x}) \frac{x}{x^*} \right) \right], \quad (2.61)$$

где $k_N \in [-1; 1]$ и $k_{M_x} \in [0; 1]$ – параметры распределения деформации;

x^*, y^* – координаты наиболее напряженной точки.

Варьируя параметры распределения деформации k_N и k_{M_x} по формуле (2.61) мы получаем все возможные деформированные состояния, для которых в наиболее напряженной точке достигается предельная деформация. Для каждого деформированного состояния по (2.54) или (2.58) могут быть рассчитаны усилия. Геометрическое место точек в координатах $N - M_x - M_y$, соответствующих предельным состояниям по прочности, будем называть поверхностью прочности сечения. На рисунке 2.13 показана одна четвертая часть поверхности прочности спаренного С-профиля в координатах $\bar{N} - \bar{M}_x - \bar{M}_y$. Плоскости $\bar{M}_x = 0$ и $\bar{M}_y = 0$ являются плоскостями симметрии поверхности прочности.

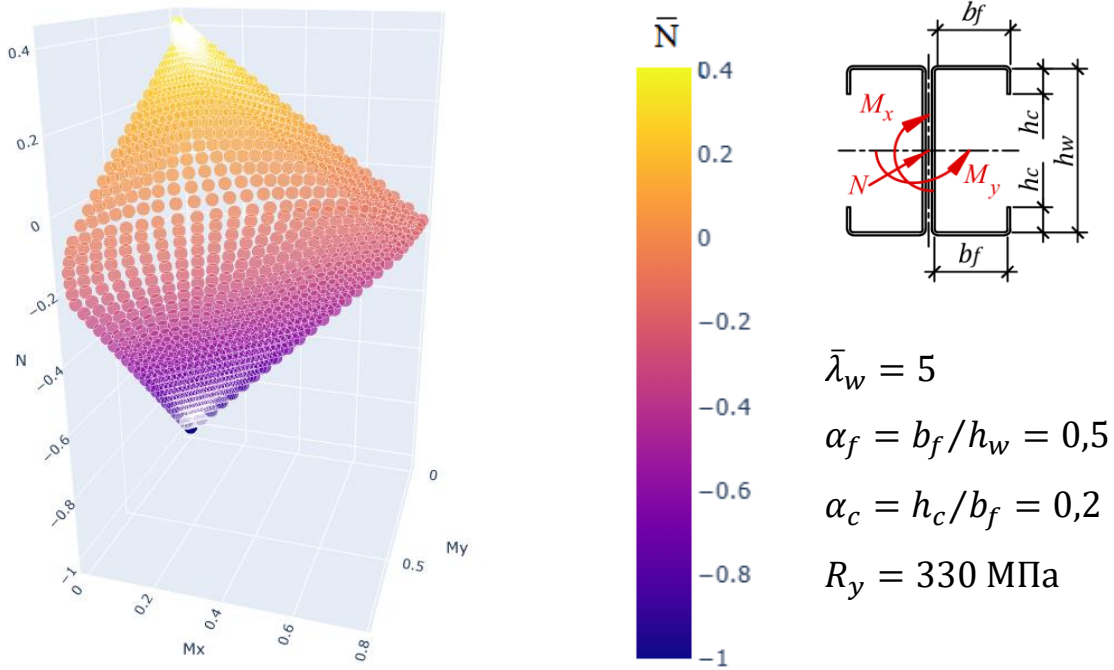


Рисунок 2.13 – Поверхность прочности сваренного С-профиля

§2.4.2 Прочность по заданному соотношению усилий

Если нагружение – простое, т.е. нагрузка на элемент возрастает пропорционально одному общему параметру, то для проверки прочности удобно будет использовать сферическую систему координат (см. рисунок 2.14) и задавать усилия в виде

$$\begin{cases} \bar{N} = \bar{F} \cdot \sin \alpha, \\ \bar{M}_x = \bar{F} \cdot \cos \alpha \sin \beta, \\ \bar{M}_y = \bar{F} \cdot \cos \alpha \cos \beta, \end{cases} \quad (2.62)$$

где $\bar{F} = \sqrt{\bar{N}^2 + \bar{M}_x^2 + \bar{M}_y^2}$ – длина вектора усилий;

$\alpha = \arctg \frac{1}{m} = \arctg \frac{\bar{N}}{\bar{M}}$ – широта вектора усилий;

$\beta = \arctg \frac{m_x}{m_y} = \arctg \frac{\bar{M}_x}{\bar{M}_y}$ – азимут вектора усилий;

$\bar{M} = \sqrt{\bar{M}_x^2 + \bar{M}_y^2}$ – суммарный момент (проекция $\bar{F}$ на плоскость $\bar{N} = 0$);

$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ – суммарный относительный эксцентриситет;

$m_x = \frac{\bar{M}_x}{\bar{N}}, m_y = \frac{\bar{M}_y}{\bar{N}}$ – относительные эксцентриситеты.

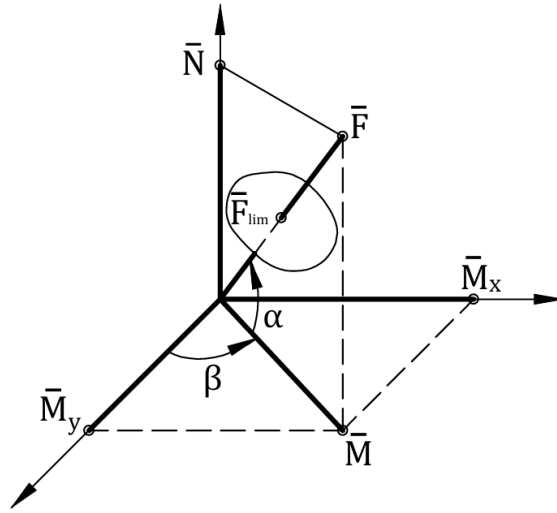


Рисунок 2.14 – Сферическая система координат

Очевидно, что поверхность прочности замкнута, и начало координат находится внутри поверхности прочности. Очевидно также, что по мере нагружения, т.е. при увеличении параметра $\bar{F}$, отрезок, проведенный из начала координат в точку с координатами $(\bar{N}, \bar{M}_x, \bar{M}_y)$, пересечет поверхность прочности в точке $(\bar{N}_{\text{lim}}, \bar{M}_{x,\text{lim}}, \bar{M}_{y,\text{lim}})$, которую обозначим $\bar{F}_{\text{lim}}$. Следовательно, проверку прочности можем выполнить по формуле

$$K_u^{str} = \frac{\bar{F}}{\bar{F}_{\text{lim}}} \leq 1, \quad (2.63)$$

где $\bar{F}_{\text{lim}} = \sqrt{\bar{N}_{\text{lim}}^2 + \bar{M}_{x,\text{lim}}^2 + \bar{M}_{y,\text{lim}}^2}$ – расстояние от начала координат до той точки на поверхности прочности, которая имеет ту же широту α и азимут β , что и действующие усилия;

$\bar{N}_{\text{lim}}, \bar{M}_{x,\text{lim}}, \bar{M}_{y,\text{lim}}$ – предельные усилия, воспринимаемые сечением.

Для практического использования проверка прочности может быть записана с учетом коэффициента надежности по условиям работы γ_c и с использованием усилий в единицах измерения

$$K_u^{str} = \frac{1}{r R_y \gamma_c} \left(\frac{|N|}{A_g} + \frac{|M_x|}{W_{x,g}} + \frac{|M_y|}{W_{y,g}} \right) \leq 1, \quad (2.64)$$

где N, M_x, M_y – действующие усилия;

$A_g, W_{x,g}, W_{y,g}$ – геометрические характеристики полного сечения;

$r = \frac{|N_{lim}|}{A_g R_y} + \frac{|M_{x,lim}|}{W_{x,g} R_y} + \frac{|M_{y,lim}|}{W_{y,g} R_y}$ – коэффициент редукции прочности сечения, зависящий от соотношения усилий.

Для нахождения координат точки $\bar{F}_{lim}$ на поверхности прочности необходимо численными методами решить систему нелинейных уравнений относительно параметров деформированного состояния k_N и k_{M_x}

$$\begin{cases} \alpha(k_N, k_{M_x}) = \alpha_{req}, \\ \beta(k_N, k_{M_x}) = \beta_{req}, \end{cases} \quad (2.65)$$

где $\alpha(k_N, k_{M_x})$ и $\beta(k_N, k_{M_x})$ – широта и азимут для точки на поверхности прочности, рассчитанной по деформированному состоянию (2.61) при значениях параметров k_N и k_{M_x} ;

α_{req} и β_{req} – широта и азимут для точки с координатами $\bar{N}, \bar{M}_x, \bar{M}_y$.

На рисунке 2.15 показаны изолинии $\alpha(k_N, k_{M_x}) = Const$, $\beta(k_N, k_{M_x}) = Const$, соответствующие поверхности прочности спаренного С-профиля, изображенной на рисунке 2.16 (параметры профиля аналогичны приведенным на рисунке 2.13).

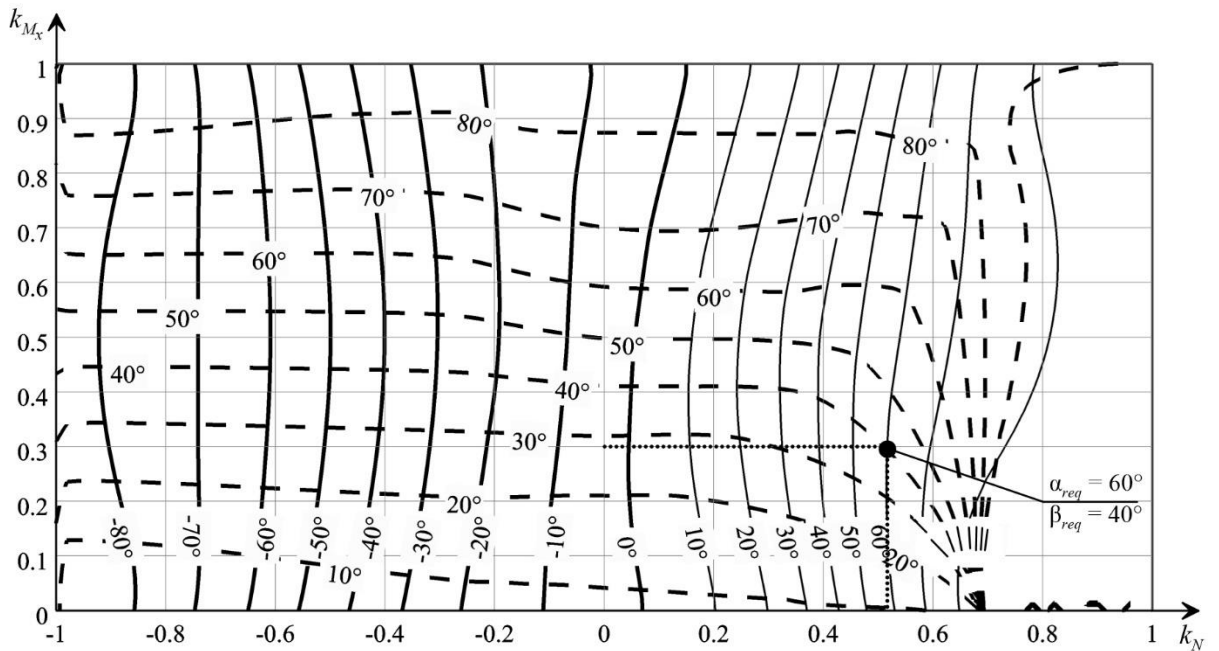


Рисунок 2.15 – Изолинии $\alpha(k_N, k_{M_x}) = Const$, $\beta(k_N, k_{M_x}) = Const$, соответствующие поверхности прочности спаренного С-профиля.

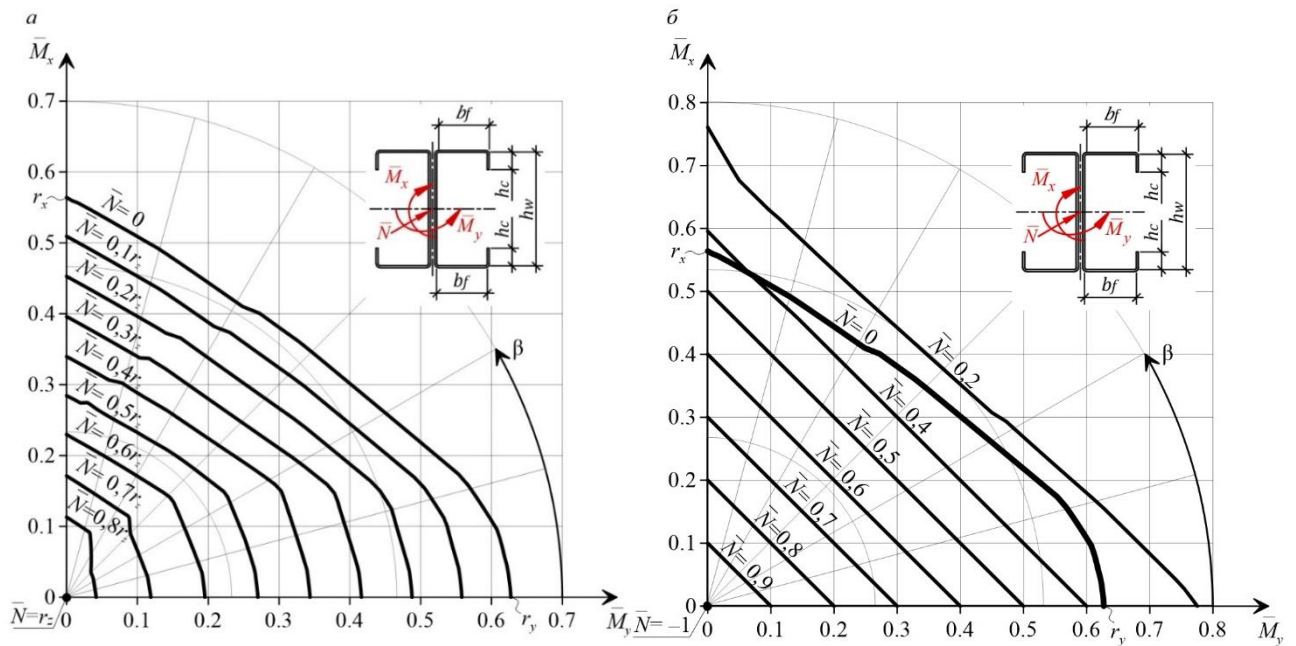


Рисунок 2.16 – Изолинии $\bar{N} = \text{Const}$ поверхности прочности
спаренного С-профиля: а) при $N \geq 0$; б) при $N \leq 0$.

Для решения системы уравнений (2.65) могут быть использованы различные численные методы, например, метод Ньютона-Рафсона [151] или метод Бroyдена [124]. Общим недостатком этих методов является чувствительность к начальному приближению и возможность выхода варьируемых переменных за границы области их определения. Это означает, что сходимость численного расчета не гарантирована.

С целью устранить этот недостаток, разработан метод решения системы (2.65), учитывающий особенности работы элементов ЛСТК, и гарантирующий сходимость.

§2.4.3 Метод определения параметров деформированного состояния

Исследуем влияние параметров k_N и k_{M_x} на значения α и β в сечении, имеющем две оси симметрии. В таблице 2.1 показаны характерные значения параметров.

Таблица 2.1 – Характерные значения параметров

k_N	k_{M_x}	$\varepsilon_z(x, y)$	$\bar{N}$	$\bar{M}_x$	$\bar{M}_y$	α	β
1	любой	$\varepsilon_{z,max}$	$\bar{N}_{c,u}$	0	0	90°	–
-1	любой	$-\varepsilon_{z,max}$	$\bar{N}_{t,u}$	0	0	-90°	–
[-1; 1]	1	$\varepsilon_{z,max} \cdot \left[k_N + (1 - k_N) \frac{y}{y^*} \right]$	$[\bar{N}_{t,u}; \bar{N}_{c,u}]$	$[0; \bar{M}_{x,u}]$	0	$[-90^\circ; 90^\circ]$	90°
[-1; 1]	0	$\varepsilon_{z,max} \cdot \left[k_N + (1 - k_N) \frac{x}{x^*} \right]$	$[\bar{N}_{t,u}; \bar{N}_{c,u}]$	0	$[0; \bar{M}_{t,u}]$	$[-90^\circ; 90^\circ]$	0

где $\bar{N}_{c,u} = r_z$ – максимальная сжимающая сила;

$\bar{N}_{t,u} = 1$ – максимальная растягивающая сила;

$\bar{M}_{x,u} = r_x$ и $\bar{M}_{y,u} = r_y$ – максимальные изгибающие моменты (при $\bar{N} = 0$).

Так как для любого значения k_{M_x} при $k_N = -1$ имеем $\alpha = -90^\circ$, а при $k_N = 1$ имеем $\alpha = 90^\circ$, по теореме о промежуточном значении для любого $\alpha_{req} \in [-90^\circ; 90^\circ]$ существует такой $k_N^* \in [-1; 1]$, что $\alpha(k_N^*) = \alpha_{req}$. То есть первое уравнение системы (2.65) может быть решено при любом значении k_{M_x} , при чем корень k_N^* всегда существует и принадлежит известному заранее интервалу.

В таблице 2.2 приведены характеристики различных численных методов решения уравнения с одним неизвестным.

Таблица 2.2 – Численные методы решения уравнения с одним неизвестным

	Бисекции	Ложного положения	Риддерса [153]	Брента [123]	Хорд (секущих)	Ньютона Рафсона
Скорость сходимости в лучшем случае	1	1,618	1,414	1,839	1,618	1,414
Гарантированная скорость сходимости	1	<1	<1	1	<1	1
Гарантия сходимости итерационного процесса	+	+	+	+	–	–
Метод не выходит за границы начального интервала поиска корня	+	+	+	+	–	–

Метод Ньютона Рафсона и метод хорд могут выходить за границы начального интервала поиска корня и не гарантируют сходимости. Метод ложного по-

ложения можно считать оптимальным, т.к. он, как правило, обеспечивает высокую скорость сходимости, при этом не сложен в реализации.

Если один из изгибающих моментов равен нулю, то достаточно решить только первое уравнение системы (2.65). Например, принимая $k_{M_x} = 1$ получим след поверхности прочности на плоскости $\bar{M}_y = 0$, который показан на рисунке 2.17а. Зависимость α от k_N для этого примера показана на рисунке 2.17б, где также тонкими пунктирными линиями показаны итерации поиска корня k_N^* методом ложного положения. Эти результаты получены для спаренного С-профиля (параметры профиля аналогичны приведенным на рисунке 2.13). Как видно по рисунку, метод ложного положения уже на второй итерации для данного примера дает приемлемую точность поиска корня.

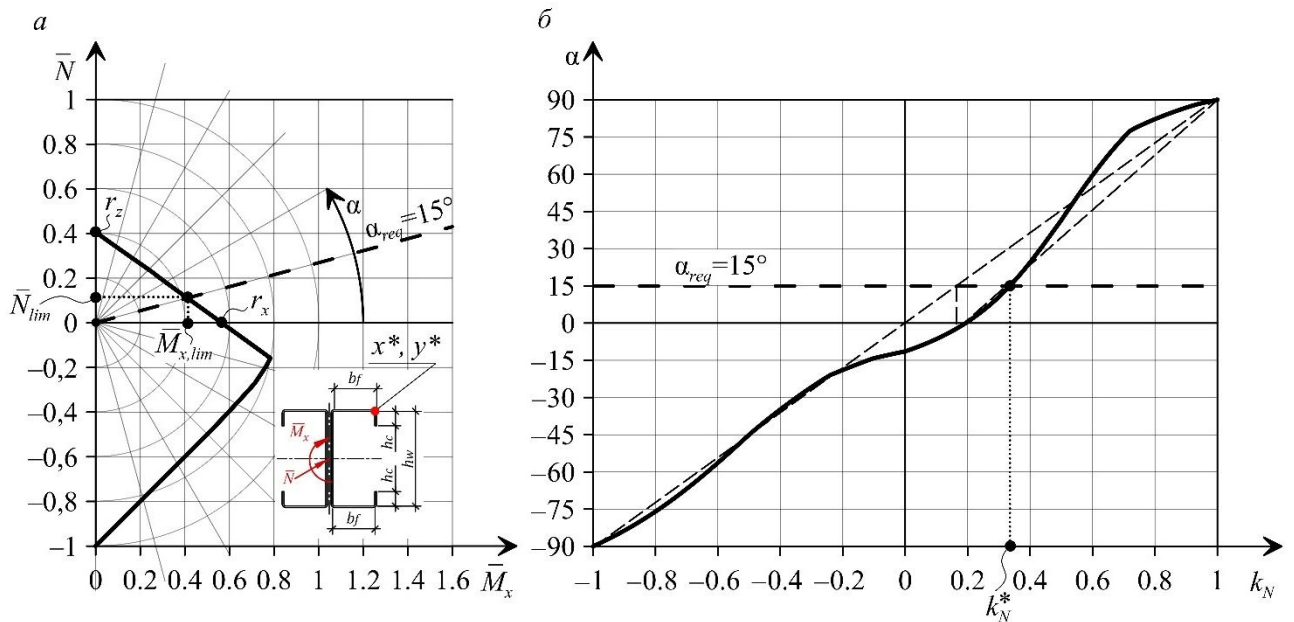


Рисунок 2.17 – Пределные состояния по прочности спаренного С-профиля:

а) след поверхности прочности на плоскости $\bar{M}_y = 0$;

б) график зависимости α от k_N при $k_{M_x} = 1$.

Обозначим функцию, которая находит корень первого уравнения системы (2.65) при заданном значении k_{M_x} , следующим образом:

$$k_N^* = f(\alpha_{req}, k_{M_x}). \quad (2.66)$$

Тогда второе уравнение системы (2.65) можно переписать в виде

$$\beta(k_N^*, k_{M_x}) = \beta_{req}. \quad (2.67)$$

Таким образом, вместо решения системы двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными нам необходимо решать уравнение (2.67) с одним неизвестным – параметром k_{M_x} , при чем на каждой итерации поиска корня уравнения (2.67) используется функция (2.66) для расчета k_N^* .

Так как при $k_{M_x} = 0$ изгибающий момент $\bar{M}_x = 0$, а при $k_{M_x} = 1$ изгибающий момент $\bar{M}_y = 0$, при этом сумма моментов $\sqrt{\bar{M}_x^2 + \bar{M}_y^2} > 0$, что обеспечивается использованием (2.66), то в соответствии с теоремой о промежуточном значении $\beta^*(k_{M_x})$ принимает все значения на интервале $\beta^* \in [0, 90^\circ]$ при варьировании k_{M_x} на интервале $k_{M_x} \in [0; 1]$. Следовательно, для решения уравнения (2.67) подходят указанные выше эффективные численные методы, гарантирующие сходимость итерационного процесса.

§2.4.4 Обобщение метода на несимметричные сечения ЛСТК

Несимметричные сечения ЛСТК имеют две отличительные особенности, затрудняющих их расчет по методике, приведенной выше:

- координаты наиболее напряженной точки могут меняться в зависимости от нагружения;
- при действии равномерных по площади сечения сжимающих напряжений схема редукции – несимметричная, что приводит к смещению центра тяжести редуцированного сечения и, как следствие, возникновению дополнительных изгибающих моментов.

Для исследования предельных состояний по прочности, соответствующих деформационному критерию (2.60), в несимметричных поперечных сечениях элементов ЛСТК, запишем распределение деформаций в виде

$$\varepsilon_z(x, y) = \varepsilon_{z, max} \cdot (k_N + k_M(y \cdot \sin \vartheta + x \cdot \cos \vartheta)), \quad (2.68)$$

где $k_N \in [-1; 1]$ и $k_M = f(k_N, \vartheta)$ – параметры распределения деформации;

ϑ – угол между главной осью нередуцированного сечения Ox и проекцией линии наибольшего наклона плоскости деформации $\mathcal{E}_z(x, y)$ на плоскость поперечного сечения (см. рисунок 2.18в).

Параметр k_N в (2.68) определяет величину осевой деформации стержня, а параметр k_M определяет величину деформации изгиба, при этом угол поворота плоскости изгиба (в которой лежит радиус кривизны оси стержня, проведенный из точки, принадлежащей рассматриваемому сечению) равен ϑ . Для того, чтобы деформация наиболее нагруженной точки сечения соответствовала $\mathcal{E}_{z,max}$, значение параметра $k_M = f(k_N, \theta)$ рассчитывается с учетом каждой i -ой «опасной» точки по следующему алгоритму:

- рассчитываем полярные координаты точек:

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \\ \omega_i = \arctg^*(x_i, y_i) = \begin{cases} \arctg \frac{y_i}{x_i}, & x_i \geq 0, \\ \arctg \frac{y_i}{x_i} + \pi, & x_i < 0, y_i \geq 0, \\ \arctg \frac{y_i}{x_i} - \pi, & x_i < 0, y_i < 0; \end{cases} \end{cases} \quad (2.69)$$

- вычисляем значение параметра k_{ci} такое, что если $k_M = k_{ci}$, то в i -ой точке возникает предельная сжимающая деформация, по формуле

$$k_{ci} = \frac{1 - k_N}{\rho_i \cdot \cos(\omega_i - \vartheta)}; \quad (2.70)$$

- вычисляем значение параметра k_{ti} такое, что если $k_M = k_{ti}$, то в i -ой точке возникает предельная растягивающая деформация, по формуле

$$k_{ti} = \frac{(-1 - k_N)}{\rho_i \cdot \cos(\omega_i - \vartheta)}; \quad (2.71)$$

- принимаем k_M равным минимальному значению из всех неотрицательных k_{ci} и k_{ti} .

Изменяя параметры k_N на интервале $[-1; 1]$ и ϑ на интервале $[-\pi; \pi]$ получим все возможные предельные деформированные состояния, интегральные усилия по (2.54) для которых составляют поверхность прочности рассчитываемо-

го сечения. На рисунке 2.18 показаны изолинии $N = \text{Const} \geq 0$ поверхности прочности несимметричного С-профиля в осях $\bar{M}_y - \bar{M}_x$.

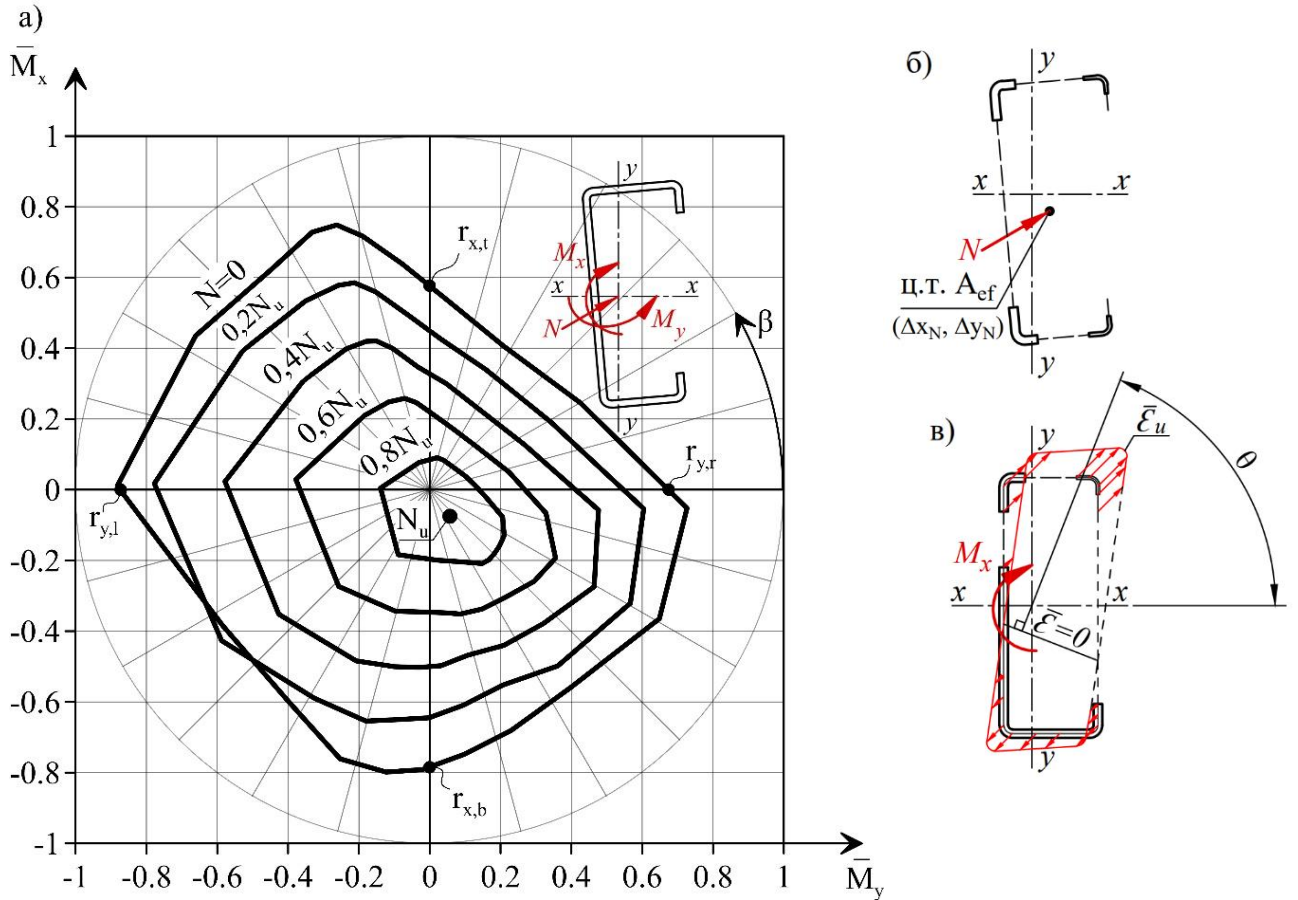


Рисунок 2.18 – Предельные состояния по прочности при трехпараметрическом загрузении несимметричного С-профиля ЛСТК: а) изолинии $N = \text{Const}$ при сжатии с изгибом; б) смещение центра тяжести эффективного сечения A_{ef} ; в) схема к расчету деформированного состояния.

Точки пересечения линии $N = 0$ с осями соответствуют предельным значениям изгибающих моментов, которые в безразмерном виде равны коэффициентам редукции $\bar{M}_{x,t,u} = r_{x,t}$, $\bar{M}_{x,b,u} = r_{x,b}$, $\bar{M}_{y,r,u} = r_{y,r}$ и $\bar{M}_{y,l,u} = r_{y,l}$. Точка $N = N_u = r_z A_g R_y$ имеет координаты $M_{x,N_u} = N \Delta y_N$, $M_{y,N_u} = N \Delta x_N$, где Δx_N и Δy_N – координаты центра тяжести редуцированного сечения (см. рисунок 2.18 б).

Для оценки прочности элементов ЛСТК при расчете редукции по фактическому распределению напряжений будем использовать формулы (2.63) и (2.64). При этом для нахождения координат точки $\bar{F}_{lim}$ на поверхности прочности

несимметричного сечения ЛСТК соотношения между действующими усилиями будем определять двумя параметрами

$$\alpha(N, M_x, M_y) = \arctg \frac{1}{m_{cor}} = \arctg \frac{\bar{N}}{\sqrt{\bar{M}_{x,cor}^2 + \bar{M}_{y,cor}^2}}, \quad (2.72)$$

$$\beta(N, M_x, M_y) = \arctg^*(m_{y,cor}, m_{x,cor}) = \arctg^*(\bar{M}_{y,cor}, \bar{M}_{x,cor}),$$

где $m_{cor} = \sqrt{m_{x,cor}^2 + m_{y,cor}^2}$ – суммарный относительный эксцентриситет;

$m_{x,cor} = \frac{M_{x,cor}}{N} \cdot \frac{A_g}{W_{x,g}}$ и $m_{y,cor} = \frac{M_{y,cor}}{N} \cdot \frac{A_g}{W_{y,g}}$ – относительные эксцентриситеты;

$\bar{N} = \frac{N}{A_g R_y}$, $\bar{M}_{x,cor} = \frac{M_{x,cor}}{W_{x,g} R_y}$ и $\bar{M}_{y,cor} = \frac{M_{y,cor}}{W_{y,g} R_y}$ – безразмерные значения усилий;

$$M_{x,cor} = \begin{cases} M_x - N \cdot \Delta y_N, & N > 0 \\ M_x, & N \leq 0 \end{cases} \text{ и } M_{y,cor} = \begin{cases} M_y - N \cdot \Delta x_N, & N > 0 \\ M_y, & N \leq 0 \end{cases} - \text{скоррек-}$$

тированные значения изгибающих моментов.

$\arctg^*(x, y)$ – функция расчета угла в полярной системе координат, см. (2.69).

Параметры α и β являются по своей сути широтой и азимутом точки $(\bar{M}_{y,cor}; \bar{M}_{x,cor}; \bar{N})$ в сферической системе координат. Задача численного расчета сводится к решению системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \alpha(k_N, \vartheta) = \alpha_{req}, \\ \beta(k_N, \vartheta) = \beta_{req}, \end{cases} \quad (2.73)$$

где $\alpha(k_N, \vartheta)$ и $\beta(k_N, \vartheta)$ – параметры, рассчитанные по формуле (2.72) с использованием усилий, рассчитанных по формуле (2.54) по деформированному состоянию (2.68) для заданных k_N и ϑ ;

α_{req} и β_{req} – параметры, рассчитанные по (2.72) для действующих значений усилий N, M_x, M_y .

Корни k_N^* и ϑ^* системы уравнений (2.73) используются для расчета по формуле (2.54) значений $N_{lim}, M_{x,lim}, M_{y,lim}$.

Стоит отметить, что скорректированные значения изгибающих моментов $M_{x,cor}$ и $M_{y,cor}$ используются исключительно для расчета параметров соотношения усилий α и β . По сути при сжатии ($\bar{N} > 0$) для расчета углов α и β мы ис-

пользуем систему координат $\bar{N} - \bar{M}_{x,cor} - M_{y,cor}$, в которой точка $N = N_u$ имеет координаты $M_{x,cor,N_u} = 0$, $M_{y,cor,N_u} = 0$, т.е. лежит на оси $\bar{N}$, а потому угол α принимает значение $\alpha = 90^\circ$ при $k_N = 1$, как показано в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения $\alpha(k_N, \vartheta)$ для крайних значений k_N

k_N	N	M_x	M_y	$M_{x,cor}$	$M_{y,cor}$	α_{cor}
-1	$N_{t,u} < 0$	0	0	0	0	-90°
1	$N_{c,u} > 0$	$N_{c,u}\Delta y$	$N_{c,u}\Delta x$	0	0	90°

Так как для любого значения θ при $k_N = -1$ имеем $\alpha = -90^\circ$, а при $k_N = 1$ имеем $\alpha = 90^\circ$, по теореме о промежуточном значении для любого $\alpha_{req} \in [-90^\circ; 90^\circ]$ существует такой $k_N^* \in [-1; 1]$, что $\alpha(k_N^*) = \alpha_{req}$. То есть первое уравнение системы (2.73) может быть решено при любом значении θ , при чем корень k_N^* всегда существует и принадлежит известному заранее интервалу. Обозначим функцию, которая находит корень первого уравнения системы (2.73) при заданном значении θ , следующим образом:

$$k_N^* = f(\alpha_{req}, \theta). \quad (2.74)$$

Тогда второе уравнение системы (2.73) можно переписать в виде

$$\beta(k_N^*, \theta) = \beta_{req}. \quad (2.75)$$

Очевидно, что если сумма моментов $\sqrt{\bar{M}_x^2 + \bar{M}_y^2} > 0$, что обеспечивается использованием (2.74), то при варьировании ϑ на интервале $\vartheta \in [-\pi; \pi]$ параметр $\beta^*(k_N^*, \theta)$ принимает все возможные значения $\beta^* \in [-\pi; \pi]$.

Если сечение не редуцировано, то решением уравнения (2.75) является $\vartheta^* = \beta_{req}$, поэтому для начального интервала $\vartheta \in [\vartheta_1; \vartheta_2]$ поиска решения в нелинейном расчете можно использовать четверть окружности: $\vartheta_1 = \beta_{req} - \frac{\pi}{4}$, $\vartheta_2 = \beta_{req} + \frac{\pi}{4}$. Если при этом $(\beta^*(\vartheta_1) - \beta_{req}) \cdot (\beta^*(\vartheta_2) - \beta_{req}) > 0$, что означает отсутствие решения на начальном интервале, границы ϑ_1 и ϑ_2 начального интер-

вала следует расширять до тех пор, пока проверка наличия решения не будет удовлетворена.

Для решения уравнения (2.75), таким образом, подходят указанные в предыдущем параграфе численные методы.

§2.5. Особенности работы спаренных U-, C- Σ -образных сечений

Проанализируем работу спаренных в двутавр U-, C- и Σ -образных профилей при совместном действии усилий. Для этого выполним сравнение предельных значений усилий, рассчитанных по требованиям действующих норм [2] (см. аналогичную формулу (2.42)) с результатами численных расчетов обратным методом при совместном действии усилий.

На рисунке 5.2 главы 5 показаны изолинии поверхности предельных состояний для спаренных в двутавр C-профилей для стали с расчетным сопротивлением $R_y = 330$ МПа для разных значений гибкости стенки. Коэффициенты формы приняты $\alpha_f = b_f/h_w = 0,5$ и $\alpha_c = h_c/b_f = 0,2$. Как видно на рисунке 5.2 а, нормативная оценка прочности при действии N и M_x хорошо согласуется с действительной прочностью, рассчитанной по фактическому распределению напряжений. В то же время при действии N и M_y (см. рисунок 5.2 б) нормативная оценка оказывается несколько завышенной.

Такие результаты объясняются влиянием дополнительного изгибающего момента от смещения центра тяжести редуцированного сечения: внешняя продольная сила действует по центру тяжести полного сечения (см. рисунок 2.19а), в то время как реакция сечения действует по центру тяжести редуцированного сечения, координаты которого в осях полного сечения обозначены $(\Delta x, \Delta y)$, поэтому сечением кроме внешнего изгибающего момента воспринимается также дополнительный момент (см. рисунок 2.19б), что снижает его несущую способность.

При совместном действии продольной силы, близкой к N_u , и малого изгибающего момента $M_y \approx (0,05 \dots 0,1)M_{y,u}$ возникает значительное смещение цен-

тра тяжести редуцированного сечения, поэтому нормативная проверка прочности завышает несущую способность сечений с большой гибкостью пластин.

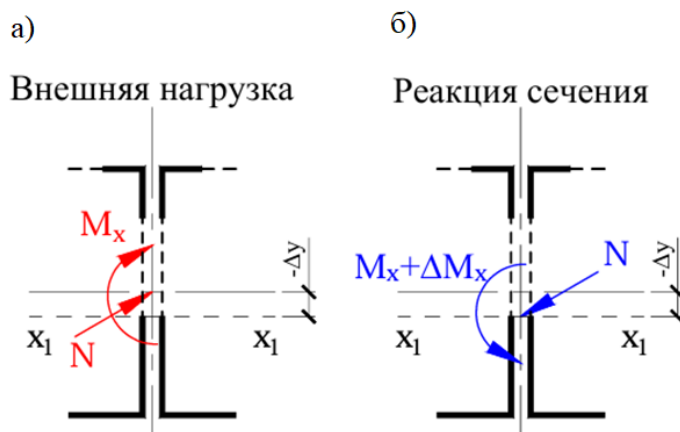


Рисунок 2.19 – Влияние дополнительного эксцентриситета Δy от смещения центра тяжести редуцированного сечения: а) внешняя нагрузка, б) реакция сечения.

Этот эффект проявляется в спаренных U-, C- и Σ -профилях, и для его учета нормами предусмотрены коэффициенты условий работы $\gamma_c = 0,75 \dots 0,95$, которые зависят от толщины стенки (а не от гибкости) и в одних случаях существенно занижают оценку прочности и устойчивости, а в других случаях недооценивают снижение несущей способности.

Снижение несущей способности при совместном действии N и M_y для «двутавровых» ЛСТК можно учесть введением в расчет дополнительного эксцентриситета Δx_H , метод определения которого приведен в §5.2 настоящей работы.

Характерные изолинии $N = \text{Const} \geq 0$ предельных состояний по прочности спаренных в двутавр C-профилей показаны на рисунке 5.3 главы 5. Нетрудно заметить, что в отсутствии продольной силы профиль имеет резервы несущей способности по сравнению с нормативной оценкой. По мере увеличения продольной силы увеличивается и негативное влияние дополнительных изгибающих моментов от смещения центра тяжести.

Резервы прочности при совместном действии изгибающих моментов возникают также и в спаренных Σ -профилях, и в гораздо меньшей степени в спаренных швеллерах.

Инженерный метод проверки прочности ЛСТК с учетом резервов несущей способности при совместном действии усилий приведен в §5.2 настоящей работы.

§2.6. Выводы по главе

1. Для определения редукции сечения установлены зависимости относительной эффективной ширины пластинок и относительной эффективной толщины элементов их усиления от безразмерных параметров: условной гибкости, распределения напряжений и соотношения расчетного сопротивления к модулю упругости. Предложено использовать коэффициенты редукции сечения в качестве интегральных безразмерных параметров.
2. Предложено два метода расчета коэффициентов редукции сечения: численно-аналитический метод и «обратный» численный метод «Сечение». Численно-аналитический метод, предполагающий итерационное уточнение координат центра тяжести сечения, слишком сложен для использования в практике проектирования.
3. Идея «обратного» численного метода «Сечение» состоит в расчете усилий, соответствующих заданному предельному деформированному состоянию. Перебирая все возможные значения параметров распределения деформаций в сечении, метод позволяет получить все возможные предельные состояния по прочности.
4. Разработан метод определения параметров распределения деформаций в сечении, соответствующих заданному соотношению действующих усилий, который позволяет выполнить расчет прочности с учетом фактической редукции за считанное количество итераций.
5. Прочность спаренных в двутавр швеллеров, С- и Σ -профилей ЛСТК при сжатии с эксцентриситетом в плоскости стенки хорошо аппроксимируется нормативной формулой, но при сжатии с эксцентриситетом в плоскости полки нормативная оценка может быть завышена. При сжатии с двухосным эксцентриситетом выявлены резервы прочности,

ГЛАВА 3. ОБЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК

§3.1. Предварительные замечания

В действующем своде правил проектирования ЛСТК [2] используется метод расчета общей устойчивости, заимствованный из европейских нормативных документов [113], [114]. Как отмечают авторы этого метода в работе [122], формула проверки общей устойчивости при действии продольной силы и двух изгибающих моментов является обобщением частных проверок:

- прочности при изгибе (при условии $N = 0$);
- устойчивости при центральном сжатии в двух плоскостях (при условии $M_x = M_y = 0$);
- устойчивости по изгибной форме в двух плоскостях при внецентренном сжатии (при условии $M_x = 0$ или $M_y = 0$);
- устойчивости плоской формы изгиба (при условии $N = 0$, $M_y = 0$);
- устойчивости по изгибно-крутильной форме (при условии $M_y = 0$).

Негативное влияние от закручивания стержня вокруг продольной оси при совместном действии N и M_x учитывается введением сложной системы аппроксимирующих коэффициентов, которые увеличивают изгибающий момент M_x , что отмечалось автором диссертации в работе [34], при чем момент сопротивления W_y при расчете устойчивости по изгибно-крутильной форме не учитывается вовсе, а для подсчета коэффициентов увеличения изгибающего момента M_x используются критические силы по изгибной $N_{cr,y}$ и крутильной $N_{cr,t}$ формам, которые, как известно, не равны критическим силам по изгибно-крутильной форме. Такой подход противоречит физическому смыслу потери устойчивости по изгибно-крутильной форме, когда изгибающий момент M_{x0} , действующий в плоскости большей жесткости недеформированного стержня, за счет закручивания стержня θ раскладывается на моменты $M_x = M_{x,0} \cos \theta$ и $M_y = M_{x,0} \sin \theta$ в главных осях поперечного сечения деформированного стержня.

К другим недостаткам применения европейского метода расчета общей устойчивости можно отнести:

- метод не гармонизирован с требованиями отечественного свода правил [1];
- используется большое количество промежуточных вычислений;
- метод не позволяет рассчитать коэффициенты устойчивости.

Все это затрудняет анализ результатов.

Краткая история развития отечественного нормативного метода расчёта общей устойчивости приведена автором диссертации в статье [34].

Отметим ключевые особенности метода:

- основные формулы проверки устойчивости с использованием коэффициентов « φ », « φ_e » и «с» используются более 70 лет;
- метод совершенствовался путем уточнения значений коэффициентов;
- современная формула расчета коэффициента « φ » получена из приближенного решения задачи прочности в наиболее нагруженном поперечном сечении внецентренно-сжатого упругого стержня при расчете по деформированной схеме [103];
- «случайный» эксцентриситет для «центрально» сжатых стержней определяется по формуле $m_{cl} = -\alpha + \beta \bar{\lambda}$, где α и β – параметры, подобранные так, чтобы график $\varphi = f(\bar{\lambda})$ хорошо аппроксимировал европейские кривые [119], полученные в 1970-х годах;
- «случайный» эксцентриситет не участвует в формулах в явном виде, а значения параметров α и β для трех кривых потери устойчивости «а», «b» и «с» сведены в таблицу 7 свода правил [1];
- коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии « φ_e » принимается по таблице, в которой приведены результаты для «эталонного» прямоугольного сечения, рассчитанные с учетом развития упругопластических деформаций;
- все другие поперечные сечения для расчета « φ_e » приводятся к прямоугольному сечению через коэффициенты влияния формы сечения.

Элементы ЛСТК рассчитывают только в упругой стадии, развитие пластических деформаций не допускается, поэтому мы, с одной стороны, не можем использовать таблицу значений « φ_e », с другой стороны, можем использовать аналогичные нормативному методу значения «случайного» эксцентриситета. В таком случае при отсутствии редукции будем получать коэффициенты устойчивости при центральном сжатии, соответствующие нормам [1].

Один из наиболее эффективных «обратный» метод исследования устойчивости элементов стальных конструкций был предложен Г.И. Белым в работе [28], а совместно с М.О. Смирновым этот метод был распространен на элементы ЛСТК [40]. Обратный метод позволил задаваться всевозможными предельными напряженно-деформированными состояниями в наиболее нагруженном поперечном сечении элемента ЛСТК, и определять соответствующее загрузке сжатия на торцах. Из всех результатов, полученных простым перебором входных параметров, можно было путем отбора получить результаты, отвечающие конкретному загрузке. Для дальнейшего развития обратного метода расчета необходимо было разработать эффективный способ определения входных параметров, соответствующих заданному загрузке на торцах.

Наиболее актуальные задачи исследования общей устойчивости ЛСТК, таким образом, следующие:

- систематизировать необходимые для построения практического метода расчета решения задач устойчивости и привести их к общей системе обозначений;
- усовершенствовать обратный численно-аналитический метод расчета устойчивости для получения результатов, соответствующих заданному загрузке на торцах;
- используя закономерности, выявленные при исследовании устойчивости элементов ЛСТК обратным методом, разработать практический метод расчета, гармонизированный с отечественным сводом правил [1].

§3.2. Аналитическое решение деформационной задачи устойчивости

Используя свойство конгруэнтности собственных форм потери устойчивости сжатых стержней, имеющих различные условия закрепления [77], будем исследовать устойчивость стержня, имеющего длину l , закрепленного шарнирно-неподвижно с одной стороны (ограничены перемещения u, v, w), и шарнирно-подвижно – с другой (ограничены перемещения u, v), при этом стержень закреплен от поворота на двух концах (ограничены перемещения θ), но деформация не ограничена (см. рисунок 3.1). В соответствии с подходом СП 16.13330.2017 стержни с другими условиями закрепления могут быть приведены к эквивалентному шарнирно-закрепленному путем использования расчетной длины, принимаемой в зависимости от решаемой задачи $l = l_x = \mu_x l_{0,x}$ или $l = l_y = \mu_y l_{0,y}$, где $l_{0,x}$ и $l_{0,y}$ – геометрическая длина, μ_x и μ_y – соответствующие коэффициенты расчетной длины.

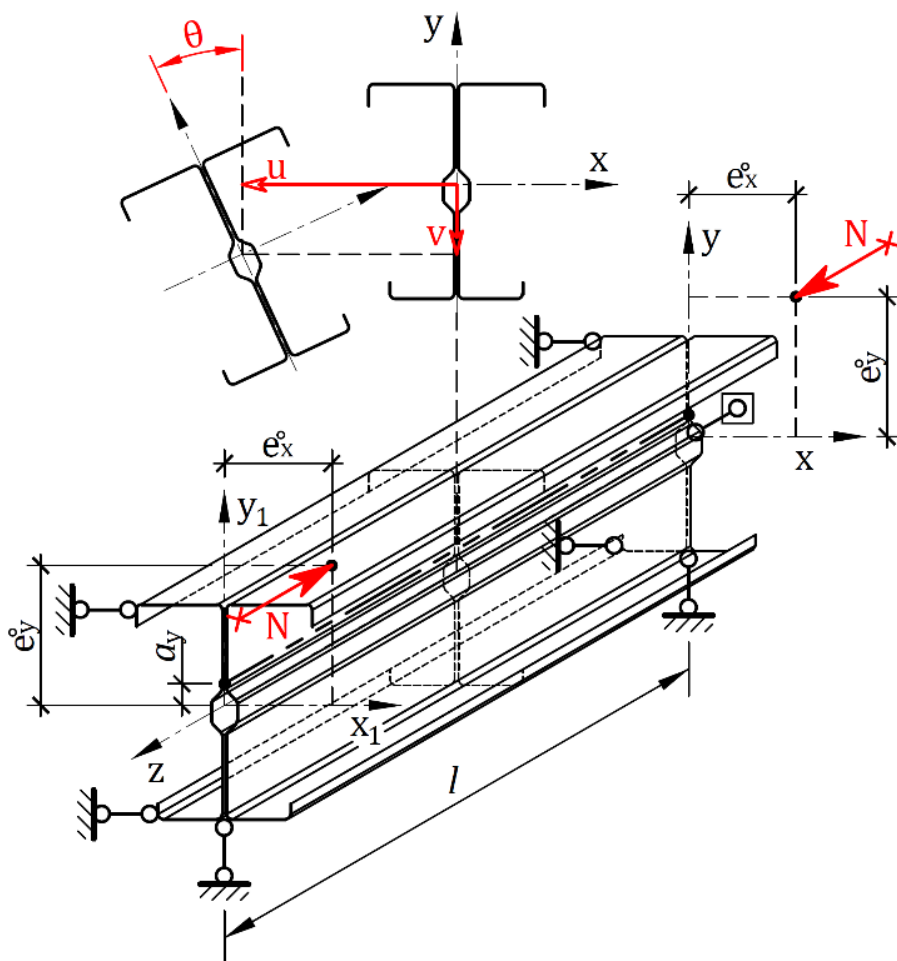


Рисунок 3.1 – Расчетная схема стержня.

Для получения практически значимых результатов достаточно ограничить круг рассматриваемых поперечных сечений теми, что имеют хотя бы одну ось симметрии « y », при чем момент инерции относительно этой оси I_y не больше момента инерции I_x . Координату центра изгиба вдоль оси симметрии обозначим a_y .

Круг рассматриваемых загрузжений ограничим внецентренным сжатием с эксцентриситетами e_x^0 и e_y^0 в плоскостях меньшей и большей жесткости, что соответствует подходу СП 16.13330.2017.

Используем для исследования устойчивости и равновесных деформированных состояний стержня техническую теорию расчёта тонкостенных стержней Власова В.З. [55] и деформационную теорию упругих стержней Воробьёва Л.Н. [57], Броуде Б.М. [49], Воронцова Г.В. [58], обобщенную Бейлиным Е.А. [8]. В системе (4.2) [8] первые два дифференциальных уравнения предварительно интегрируем.

Так как поворот стержня вокруг продольной оси θ оказывает малое влияние на перемещения в плоскости большей жесткости v при условии $I_x \gg I_y$, а кроме того, за счет поворота происходит разгрузка стержня в плоскости большей жесткости, в запас устойчивости принимаем $N(v - \theta e_x^0) \approx Nv$ и получаем систему дифференциальных уравнений

$$EI_x v'' + Nv = -Ne_{y,v}^0, \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} EI_y u'' + N \left[u + \theta (e_{y,u}^0 - a_y) \right] = -Ne_x^0, \\ EI_\omega \theta^{IV} - GI_k \theta'' + N (e_{y,u}^0 - a_y) u'' + N (i_A^2 + 2\beta_y e_{y,u}^0) \theta'' = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

где E и G – модули упругости и сдвига;

I_x, I_y – моменты инерции относительно осей x и y ;

I_ω – секториальный момент инерции;

$I_k = \frac{\alpha}{3} \sum b_i t_i^3$ – момент инерции чистого кручения;

b_i и t_i – ширина и толщина пластинок, составляющих поперечное сечение;

$\alpha \approx 1$ – коэффициент влияния формы сечения, определяемый, как правило, экспериментально;

$i_A^2 = i_p^2 + a_y^2$ и $\beta_y = \frac{1}{2I_x} \oint_A (x^2 + y^2) y dA - a_y$ – см. [55];

$i_p^2 = \frac{I_p}{A} = \frac{I_x + I_y}{A}$ – квадрат полярного радиуса инерции.

Общая система дифференциальных уравнений с учетом принятых допущений распалась на независимое уравнение (3.1) и систему (3.2). Уравнение (3.1) соответствует изгибной форме потери устойчивости, при этом эксцентриситет $e_{y,v}^0$ в соответствии с пунктом 9.2.3 СП 16.13330.2017 принимается по наибольшему моменту в пределах длины колонны. Система (3.2) соответствует изгибно-крутильной форме потери устойчивости, при этом эксцентриситет $e_{y,u}^0$ в соответствии с пунктом 9.2.6 СП 16.13330.2017 принимается по наибольшему моменту в пределах средней трети длины.

Полагая e_x и/или e_y равными нулю из уравнений (3.1)-(3.2) можем получить уравнения и системы, соответствующие различным бифуркационным и деформационным задачам устойчивости, решения которых были опубликованы в многочисленных работах (см., например, [26]).

Представим необходимые для разработки практического метода решения задач устойчивости с использованием унифицированной системы обозначений.

§3.2.1 Изгибная форма (бифуркационная задача)

Полагая в уравнении (3.1) $e_{y,v}^0 = 0$, получим

$$EI_x v'' + Nv = 0. \quad (3.3)$$

Решение уравнения (3.3), которое получено Л. Эйлером в 1744 году [110], запишем с точностью до амплитуды прогиба V_{ycm} , значение которой не определено

$$v(z) = V_{ycm} \sin \frac{k\pi z}{l_x} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3.4)$$

Минимальное значение критической силы соответствует первой форме потери устойчивости при $k=1$ (см. рисунок 3.2)

$$N_{cr,x} = \frac{\pi^2 EI_x}{l_x^2}. \quad (3.5)$$

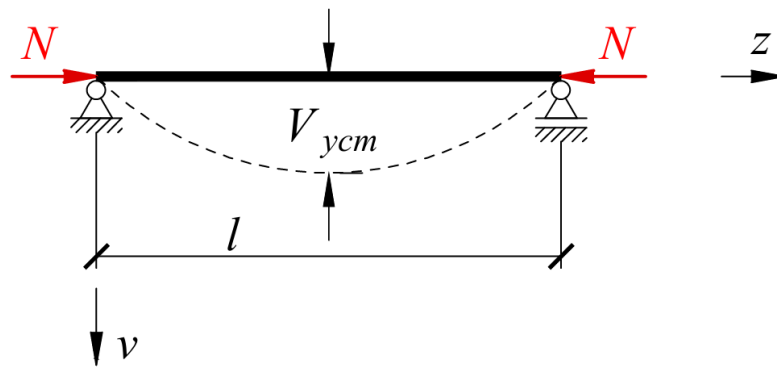


Рисунок 3.2 – Первая форма потери устойчивости

§3.2.2 Изгибная форма (деформационная задача)

Полагая в уравнении (3.1) $e_{y,v}^0 > 0$, необходимо решить деформационную задачу устойчивости – определить равновесную форму $v(z)$. Решение (3.1) можно получить приближенными методами. В соответствии с методом, который предложен Белым Г.И. в работах [13], [15], выполним аппроксимацию действительной функции прогиба стержня $v(z)$ комбинацией решений частных задач: бифуркационной задачи устойчивости и задачи расчета по недеформированной схеме

$$v(z) = v_H(z) + v_{уст}(z), \quad (3.6)$$

где $v_H(z) = V_H \cdot 4\left(\bar{z} - \bar{z}^2\right)$, $V_H = \frac{Nl_x^2}{8EI_x} e_{y,0}$ – форма и амплитуда прогиба из расчета

по недеформированной схеме (см. рисунок 3.3);

$v_{уст}(z) = V_{уст} \cdot \sin(\pi \bar{z})$ – функция прогиба из решения бифуркационной задачи устойчивости;

$V_{уст}$ – неизвестная амплитуда;

$\bar{z} = \frac{z}{l_x}$ – относительная координата.

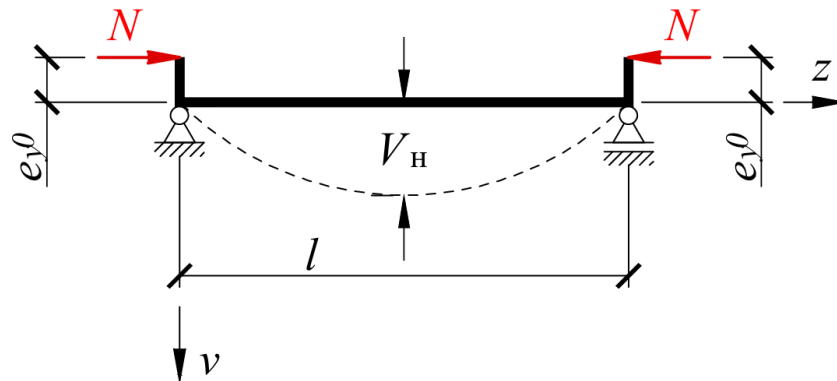


Рисунок 3.3 – К расчету по недеформированной схеме

При использовании аппроксимации (3.6), фактически, решаем задачу о равновесной форме центрально сжатого стержня, имеющего начальное искривление, соответствующее функции $v_H(z)$ (см. рисунок 3.4).

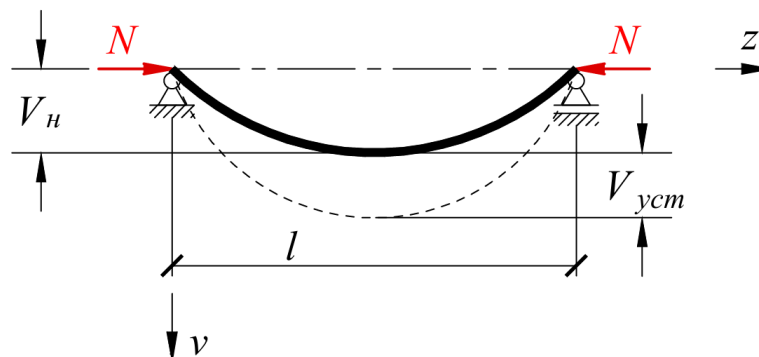


Рисунок 3.4 – К расчету по деформированной схеме

Обозначим дифференциальный оператор, соответствующий уравнению (3.1)

$$L_v = EI_x v'' + Nv + Ne_y^0 = 0. \quad (3.7)$$

Подставим аппроксимацию (3.6) в (3.7), получим

$$L_v = EI_x (v_H(z) + v_{ycm}(z))'' + N(v_H(z) + v_{ycm}(z)) + Ne_y^0 = 0. \quad (3.8)$$

Учитывая, что

$$v_H'' = -\frac{8V_H}{l_x^2}, \quad v_{ycm}'' = -\frac{\pi^2}{l_x^2} v_{ycm}, \quad e_y^0 = V_H \frac{8EI_x}{Nl_x^2}, \quad (3.9)$$

получим

$$L_v = Nv_H(z) - v_{ycm}(z)(N_{cr,x} - N) = 0. \quad (3.10)$$

Представим функции прогиба в виде

$$v_H(\bar{z}) = V_H \cdot \psi_H(\bar{z}), \quad (3.11)$$

$$v_{ycm}(\bar{z}) = V_{ycm} \cdot \psi_{ycm}(\bar{z}), \quad (3.12)$$

где $\psi_H(\bar{z}) = 4\left(\bar{z} - \bar{z}^2\right)$ – форма прогиба при расчете по недеформированной схеме;

$\psi_{ycm}(\bar{z}) = \sin(\pi\bar{z})$ – форма дополнительного прогиба.

Амплитуда дополнительного прогиба V_{ycm} может быть определена методом Бубнова-Галёркина

$$\int_0^1 L_v \psi_{ycm}(\bar{z}) d\bar{z} = 0, \quad (3.13)$$

Подставим (3.10) в (3.13), получим

$$NV_H \int_0^1 \psi_H \psi_{ycm} d\bar{z} - (N_{cr,x} - N)V_{ycm} \int_0^1 \psi_{ycm}^2 d\bar{z} = 0. \quad (3.14)$$

Заметим, что

$$\int_0^1 \psi_H \psi_{ycm} d\bar{z} = \int_0^1 4 \left(\bar{z} - \bar{z}^2 \right) \sin(\pi \bar{z}) d\bar{z} = \frac{16}{\pi^3}, \quad (3.15)$$

$$\int_0^1 \psi_{ycm}^2 d\bar{z} = \int_0^1 \sin^2(\pi \bar{z}) d\bar{z} = 0,5. \quad (3.16)$$

Тогда значение искомой амплитуды

$$V_{ycm} = V_H \frac{N/N_{cr,x}}{1 - N/N_{cr,x}} \times \frac{32}{\pi^3}. \quad (3.17)$$

Для перехода от концевых эксцентриситетов к эксцентриситету в точке максимального прогиба стержня (в середине пролета) удобно использовать деформационный коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$K_{d,x} = \frac{e_{y,v}^o + v_{\max}}{e_{y,v}^o} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{cr,x}} \left(1 + \frac{32}{\pi^3} \times \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,x}}{1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,x}} \right), \quad (3.18)$$

где $v_{\max} = V_H + V_{ycm}$ – максимальный прогиб стержня;

$$\bar{N} = \frac{N}{AR_y}, \quad \bar{N}_{cr,x} = \frac{N_{cr,x}}{AR_y} = \frac{\pi^2}{\lambda_x^2} - \text{действующая и критическая силы в безраз-}$$

мерном виде;

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y/E} - \text{условная гибкость};$$

$$\lambda_x = l_x/i_x - \text{гибкость}; \quad i_x = \sqrt{I_x/A} - \text{радиус инерции}.$$

Вместо формулы (3.18) при разработке практического метода расчета будем использовать упрощенную формулу

$$K_{d,x} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,x}}{1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,x}}. \quad (3.19)$$

§3.2.3 Крутильная форма (бифуркационная задача)

Полагая в системе (3.2) $e_x^o = e_{y,u}^o = a_y = 0$, получим два независимых уравнения

$$EI_y u'' + Nu = 0, \quad (3.20)$$

$$EI_\omega \theta^{IV} - GI_k \theta'' + N \cdot i_A^2 \theta'' = 0. \quad (3.21)$$

Уравнение (3.20) аналогично уравнению (3.3), но для плоскости меньшей жесткости, а уравнение (3.21) соответствует задаче потери устойчивости центрально-сжатого стержня по крутильной форме, и его решение с точностью до амплитуды закручивания Θ_{ycm} , значение которой не определено, имеет вид

$$\theta(z) = \Theta_{ycm} \sin \frac{k\pi z}{l_y} \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (3.22)$$

Минимальное значение критической силы соответствует первой форме потери устойчивости при $k = 1$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_A^2} \left(GI_k + EI_\omega \frac{\pi^2}{l_y^2} \right). \quad (3.23)$$

§3.2.4 Изгибно-крутильная форма (бифуркационная задача)

Полагая в системе (3.2) $e_x^0 = 0$, а также $e_{y,u}^0 > a_y$, получим

$$\begin{cases} EI_y u'' + N \left[u + \theta(e_{y,u}^0 - a_y) \right] = 0, \\ EI_\omega \theta^{IV} - GI_k \theta'' + N(e_{y,u}^0 - a_y) u'' + N(i_A^2 + 2\beta_y e_{y,u}^0) \theta'' = 0. \end{cases} \quad (3.24)$$

Запишем решение системы (3.24) с точностью до произвольных амплитуд перемещений U_{ycm} и Θ_{ycm}

$$\begin{cases} u = U_{ycm} \sin \frac{k\pi z}{l_y}, \\ \theta = \Theta_{ycm} \sin \frac{k\pi z}{l_y}. \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3.25)$$

Определим критическую силу, соответствующую первой форме потери устойчивости при $k = 1$, путем подстановки (3.25) в (3.24)

$$\begin{cases} N(e_{y,u}^o - a_y) \Theta_{ycm} \Psi_{ycm} - (N_{cr,y} - N) U_{ycm} \Psi_{ycm} = 0, \\ \left(\frac{EI_\omega \pi^4}{l_y^4} + \frac{GI_k \pi^2}{l_y^2} - K_p N \right) \Theta_{ycm} \Psi_{ycm} - N \frac{(e_{y,u}^o - a_y) \pi^2}{l_y^2} U_{ycm} \Psi_{ycm} = 0. \end{cases} \quad (3.26)$$

где $\Psi_{ycm}(\bar{z}) = \sin(\pi \bar{z})$ – форма потери устойчивости;

$$\Psi_{ycm}'' = -\frac{\pi^2}{l_y^2} \Psi_{ycm}, \quad \Psi_{ycm}^{IV} = \frac{\pi^2}{l_y^4} \Psi_{ycm} \text{ – вторая и четвертая производные;}$$

$$K_p = (i_A^2 + \beta_y e_{y,u}^o) \pi^2 / l_y^2 \text{ – безразмерный коэффициент;}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{l_y^2} \text{ – критическая сила для изгибной формы потери устойчивости}$$

в плоскости меньшей жесткости.

Запишем (3.26) в матричном виде

$$\begin{bmatrix} N(e_{y,u}^o - a_y) & -(N_{cr,y} - N) \\ EI_\omega \frac{\pi^4}{l_y^4} + GI_k \frac{\pi^2}{l_y^2} - K_p N & -N(e_{y,u}^o - a_y) \frac{\pi^2}{l_y^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Theta_{ycm} \\ U_{ycm} \end{bmatrix} \times \Psi_{ycm} = 0, \quad (3.27)$$

Условие существования нетривиального решения ($U_{ycm} \neq 0$, $\Theta_{ycm} \neq 0$) – равенство нулю определителя

$$\begin{vmatrix} N(e_{y,u}^o - a_y) & -(N_{cr,y} - N) \\ EI_\omega \frac{\pi^4}{l_y^4} + GI_k \frac{\pi^2}{l_y^2} - K_p N & -N(e_{y,u}^o - a_y) \frac{\pi^2}{l_y^2} \end{vmatrix} = 0. \quad (3.28)$$

Тогда

$$-K_e N^2 + (N_{cr,y} - N) \left(EI_\omega \frac{\pi^4}{l_y^4} + GI_k \frac{\pi^2}{l_y^2} - K_p N \right) = 0. \quad (3.29)$$

где $K_e = (e_{y,u}^o - a_y)^2 \pi^2 / l_y^2$ – коэффициент, характеризующий эксцентриситет продольной силы.

Разделим обе части уравнения (3.29) на $(AR_y)^2$ (при этом $AR_y \neq 0$)

$$-K_e \bar{N}^2 + (\bar{N}_{cr,y} - \bar{N})(K_\omega \bar{N}_{cr,y} + K_k \bar{N}_{cr,y} - K_p \bar{N}) = 0. \quad (3.30)$$

где $K_\omega = \frac{I_\omega \pi^2}{I_y l_y^2}$, $K_k = \frac{GI_k}{EI_y}$ – коэффициенты, характеризующие соотношения

жесткостей при кручении и изгибе;

$\bar{N}_{cr,y} = \frac{N_{cr,y}}{AR_y} = \frac{\pi^2}{\bar{\lambda}_y^2}$ – критическая сила в безразмерном виде;

$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{R_y/E}$ – условная гибкость стержня;

$\lambda_y = l_y/i_y$ – гибкость стержня;

$i_y = \sqrt{I_y/A}$ – радиус инерции поперечного сечения.

Получим квадратное уравнение относительно $\bar{N}$

$$(K_p - K_e) \bar{N}^2 - \bar{N}_{cr,y} (K_k + K_p + K_\omega) \bar{N} + \bar{N}_{cr,y}^2 (K_k + K_\omega) = 0. \quad (3.31)$$

Корни квадратного уравнения (3.31) дают два значения критической силы по изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$\bar{N}_{cr,1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}, \quad (3.32)$$

где $D = b^2 - 4ac$ – дискриминант квадратного уравнения $a \bar{N}^2 + b \bar{N} + c = 0$;

$$a = K_p - K_e,$$

$$b = -\bar{N}_{cr,y} (K_k + K_p + K_\omega),$$

$$c = \bar{N}_{cr,y}^2 (K_k + K_\omega) - \text{коэффициенты уравнения.}$$

Убедимся, что критические силы (3.32) являются действительными числами, т.е. $D \geq 0$. После подстановки выражений для a , b , c и некоторых преобразований получим

$$\frac{K_p}{K_k + K_\omega} + \frac{K_k + K_\omega}{K_p} + 4\frac{K_e}{K_p} \geq 2. \quad (3.33)$$

Коэффициенты K_e , K_p , K_k и K_ω – безразмерные положительные числа (при $e_{y,u}^0 > a_y$, о чем сказано выше), поэтому условие (3.33) всегда удовлетворяется.

В работе [15] было впервые предложено решение бифуркационной задачи устойчивости (3.24), но использование безразмерных коэффициентов K_e , K_p , K_k и K_ω впервые предложено автором диссертации в статье [33]. Эти коэффициенты характеризуют соотношение жесткостей и могут быть использованы для записи критической силы крутильной формы потери устойчивости $N_{cr,T}$, а также для критического изгибающего момента $M_{cr,x}$ шарнирно-закрепленной балки при чистом изгибе

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_A^2} EI_y (K_k + K_\omega), \quad (3.34)$$

$$M_{cr,x} = \frac{\pi}{l_y} EI_y \sqrt{K_k + K_\omega}. \quad (3.35)$$

В случае $e_x^0 = 0$, $a_y > 0$ и $e_{y,u}^0 \leq a_y$ в первом уравнении системы (3.2) слагаемое $N \left[u + \theta(e_{y,u}^0 - a_y) \right] < Nu$, т.е. за счет поворота происходит уменьшение изгибающего момента. Пренебрегая, в запас устойчивости, углом поворота получаем уравнение (3.20), соответствующее устойчивости по изгибной форме.

§3.2.5 Изгибно-крутильная форма (деформационная задача)

Система уравнений (3.2) при условии $e_x^0 > 0$ и $e_{y,u}^0 > a_y$ представляет собой деформационную задачу устойчивости по изгибно-крутильной форме и не имеет решения в замкнутом виде.

Для определения равновесной формы прогиба и углов поворота используем приближенное решение по методу Г. И. Белого [13; 15], принимая

$$\begin{cases} u(z) = u_n(z) + u_{ycm}(z), \\ \theta(z) = \theta_{ycm}(z), \end{cases} \quad (3.36)$$

где $u_n(z) = U_n \cdot 4 \left(\frac{z}{l_y} - \frac{z^2}{l_y^2} \right)$, $U_n = \frac{N l_y^2}{8 E I_y} e_x^o$ – прогиб из расчета по недеформирован-

ной схеме;

$u_{ycm}(z) = U_{ycm} \cdot \sin(\pi \frac{z}{l_y})$, $\theta_{ycm}(z) = \Theta_{ycm} \cdot \sin(\pi \frac{z}{l_y})$ – дополнительные прогибы по формам потери устойчивости;

U_{ycm} , Θ_{ycm} – неизвестные амплитуды;

$\frac{z}{l_y}$ – относительная координата.

Амплитуды дополнительных прогибов определим по методу Бубнова-Галеркина.

$$\begin{cases} \Theta_{ycm} = 32 \frac{U_n (e_{y,u}^o - a_y)}{\pi l_y^2} \times \frac{(1 + K_N) \cdot \bar{N} / \bar{N}_{cr,y}}{K_k + K_\omega - (K_p + K_e K_N) \cdot \bar{N} / \bar{N}_{cr,y}}, \\ U_{ycm} = K_N \left(\frac{32}{\pi^3} U_n + \Theta_{ycm} (e_{y,u}^o - a_y) \right), \end{cases} \quad (3.37)$$

где $K_N = \frac{\bar{N} / \bar{N}_{cr,y}}{1 - \bar{N} / \bar{N}_{cr,y}}$.

Деформационный коэффициент определяется формулой

$$\begin{aligned} K_{d,y} = \frac{e_x^o + u_{\max}}{e_x^o} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{cr,y}} & \left(1 + \frac{32}{\pi^3} K_N \times \right. \\ & \left. \times \left[1 + \frac{K_e K_N}{K_k + K_\omega - (K_p + K_e K_N) \cdot \bar{N} / \bar{N}_{cr,y}} \right] \right), \end{aligned} \quad (3.38)$$

где $u_{\max} = U_n + U_{ycm}$ – максимальный прогиб стержня.

Нетрудно заметить, что $\lim_{N \rightarrow N_{cr,y}} K_{d,y}(N) = \infty$, но при этом критические силы по изгибно-крутильной форме $\bar{N}_{cr,1,2}$ (см. формулу (3.32)) могут быть меньше $\bar{N}_{cr,y}$. С учетом значений $\bar{N}_{cr,1,2}$ из (3.38) получим

$$K_{d,y} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{cr,y}} \left(1 + \frac{32}{\pi^3} \times \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,y}}{1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,y}} \times \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{K_e}{K_k + K_\omega} \cdot \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,y}}{(1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,1})(1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,2})} \right] \right). \quad (3.39)$$

Из (3.39) очевидно также, что $\lim_{N \rightarrow N_{cr,1}} K_{d,y}(N) = \infty$ и $\lim_{N \rightarrow N_{cr,2}} K_{d,y}(N) = \infty$. На увеличение деформационного коэффициента влияет также увеличение эксцентриситета $e_{y,u}^0$ (см. формулу расчета K_e в примечаниях к (3.29)) и уменьшение жесткости на кручение (см. формулы K_k и K_ω в примечаниях к формуле (3.30)).

§3.3. Влияние редукции сечения на общую устойчивость

В соответствии с методом упругих решений А. А. Ильюшина [73] компенсируем редукцию поперечного сечения путем фиктивного догружения стержня. Расчет выполним в «обратной» постановке [28]: задаваясь предельным напряженно-деформированным состоянием в наиболее нагруженном поперечном сечении $\sigma(x, y) = E \cdot \varepsilon_z(x, y)$, определим загрузку стержня на опорах N , e_y^0 и e_x^0 .

Реально действующие усилия в наиболее нагруженном поперечном сечении определим интегрированием напряжений по редуцированному сечению A_{ef}

$$\begin{cases} N = \oint_{A_{ef}} \sigma(x, y) \cdot dA_{ef}, \\ M_x = \oint_{A_{ef}} \sigma(x, y) \cdot y \cdot dA_{ef}, \\ M_y = \oint_{A_{ef}} \sigma(x, y) \cdot x \cdot dA_{ef}. \end{cases} \quad (3.40)$$

Интегрируя напряжения по нередуцированному сечению A получим полные «деформационные» усилия, которые соответствуют модели в §3.2

$$\begin{cases} N^* = E \cdot \oint_A \varepsilon(x, y) \cdot dA, \\ M_x^* = E \cdot \oint_A \varepsilon(x, y) \cdot y \cdot dA, \\ M_y^* = E \cdot \oint_A \varepsilon(x, y) \cdot x \cdot dA. \end{cases} \quad (3.41)$$

Разница между полными «деформационными» и реальными усилиями – это фиктивные усилия, которые мы прикладываем к стержню для компенсации редукции сечения

$$\begin{cases} N_f = N^* - N, \\ M_{x,f} = M_x^* - M_x, \\ M_{y,f} = M_y^* - M_y. \end{cases} \quad (3.42)$$

Интегралы (3.40) и (3.41) могут быть рассчитаны по формулам (2.58), при этом для расчета (3.40) используются пластинки редуцированного сечения, а для расчета (3.41) – пластинки полного сечения.

Следуя общепринятому подходу, в запас устойчивости будем считать фиктивные силы равномерно распределенными по длине стержня, тогда полные изгибающие моменты на опорах стержня

$$\begin{cases} M_{x,0}^* = M_{x,0} + M_{x,f}, \\ M_{y,0}^* = M_{y,0} + M_{y,f}, \end{cases} \quad (3.43)$$

где $M_{x,0} = Ne_y^0$, $M_{y,0} = Ne_x^0$ – реально действующие моменты на опорах.

Усилия по (3.41) и по (3.43) связаны соотношениями

$$\begin{cases} M_x^* = K_{d,x} \cdot M_{x,0}^*, \\ M_y^* = K_{d,y} \cdot M_{y,0}^*. \end{cases} \quad (3.44)$$

Из (3.44), используя (3.42) и (3.43), получим

$$\begin{cases} e_y^o = \frac{M_{x,0}}{N} = \frac{1}{N \cdot K_{d,x}} (M_x - M_{x,f} (K_{d,x} - 1)), \\ e_x^o = \frac{M_{y,0}}{N} = \frac{1}{N \cdot K_{d,y}} (M_y - M_{y,f} (K_{d,y} - 1)). \end{cases} \quad (3.45)$$

В безразмерном виде опорные эксцентриситеты могут быть записаны

$$\begin{cases} m_{x,0} = \frac{\bar{M}_{x,0}}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N} \cdot K_{d,x}} (\bar{M}_x - \bar{M}_{x,f} (K_{d,x} - 1)), \\ m_{y,0} = \frac{\bar{M}_{y,0}}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N} \cdot K_{d,y}} (\bar{M}_y - \bar{M}_{y,f} (K_{d,y} - 1)). \end{cases} \quad (3.46)$$

§3.4. Метод определения параметров деформированного состояния

Предельное состояние в наиболее нагруженном поперечном сечении сжатого элемента ЛСТК возникает при достижении в наиболее нагруженной точке сечения предела текучести, которому соответствует значение приведенной относительной деформации

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \frac{N^*}{A_g R_y} + \frac{M_x^*}{W_{x,g} R_y} + \frac{M_y^*}{W_{y,g} R_y} = \bar{N}^* + \bar{M}_x^* + \bar{M}_y^* = \bar{\varepsilon}_y = 1. \quad (3.47)$$

Так как деформационный критерий потери устойчивости элемента ЛСТК (3.47) аналогичен деформационному критерию предела прочности (2.60), для исследования устойчивости стержней, сжатых с различными эксцентриситетами, можем использовать деформированное состояние в наиболее нагруженном сечении по (2.61) (если поперечное сечение стержня имеет две оси симметрии) или (2.68) (для сечений с одной осью симметрии). Для любых значений k_N и k_{M_x} (или k_N и θ) можем рассчитать реальные $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$ и фиктивные $\bar{N}_f$, $\bar{M}_{x,f}$ и $\bar{M}_{y,f}$ усилия в наиболее нагруженном сечении стержня, а также опорные изгибающие моменты по следующим формулам:

$$\bar{M}_{x,0} = \begin{cases} \bar{M}_x, & \bar{N} \leq 0; \\ \frac{1}{K_{d,x}} \left(\bar{M}_x - \bar{M}_{x,f} (K_{d,x} - 1) \right), & 0 < \bar{N} < \bar{N}_{cr,x}; \\ 0, & \bar{N} \geq \bar{N}_{cr,x}; \end{cases} \quad (3.48)$$

$$\bar{M}_{y,0} = \begin{cases} \bar{M}_y, & \bar{N} \leq 0; \\ \frac{1}{K_{d,y}} \left(\bar{M}_y - \bar{M}_{y,f} (K_{d,y} - 1) \right), & 0 < \bar{N} < \min(\bar{N}_{cr,y}, \bar{N}_{cr,1}, \bar{N}_{cr,2}); \\ 0, & \bar{N} \geq \min(\bar{N}_{cr,y}, \bar{N}_{cr,1}, \bar{N}_{cr,2}). \end{cases} \quad (3.49)$$

В формулах (3.48) и (3.49) в зависимости от рассматриваемой формы потери устойчивости принимается:

- для изгибной формы потери устойчивости в плоскости большей жесткости $K_{d,x}$ по формуле (3.18), $K_{d,y} = 1$;
- для изгибной формы потери устойчивости в плоскости меньшей жесткости $K_{d,x} = 1$, $K_{d,y}$ по формуле (3.18) с заменой $\bar{N}_{cr,x}$ на $\bar{N}_{cr,y}$;
- для изгибно-крутильной формы потери устойчивости $K_{d,x} = 1$, $K_{d,y}$ по формуле (3.39), принимая $e_y^o = \frac{M_x}{N}$ по усилиям в наиболее нагруженном сечении;
- для пространственной формы потери устойчивости (при $l_x = l_y$) $K_{d,x}$ по формуле (3.18), $K_{d,y}$ по формуле (3.39), принимая e_y^o по формуле (3.45).

Варьируя параметры распределения деформации k_N и k_{M_x} (или k_N и θ) получаем все возможные опорные усилия, соответствующие достижению в наиболее нагруженном сечении стержня предельного напряженно-деформированного состояния. Геометрическое место точек с координатами $(\bar{N}; \bar{M}_{x,0}; \bar{M}_{y,0})$, соответствующих достижению предельного состояния по критерию устойчивости, будем называть поверхностью устойчивости стержня. Очевидно, что в полупространстве $\bar{N} \leq 0$ поверхность устойчивости стержня совпадает с поверхностью прочности его поперечного сечения, а в полупространстве $\bar{N} > 0$ находится внутри поверхности прочности.

Если нагружение – простое, т.е. нагрузка на элемент возрастает пропорционально одному общему параметру, то удобно будет использовать сферическую систему координат (см. рисунок 2.14) и задавать усилия в виде

$$\begin{cases} \bar{N} = \bar{F} \cdot \sin \alpha, \\ \bar{M}_{x,0} = \bar{F} \cdot \cos \alpha \sin \beta, \\ \bar{M}_{y,0} = \bar{F} \cdot \cos \alpha \cos \beta, \end{cases} \quad (3.50)$$

где $\bar{F} = \sqrt{\bar{N}^2 + \bar{M}_{x,0}^2 + \bar{M}_{y,0}^2}$ – длина вектора усилий на опорах стержня;

$\alpha = \arctg \frac{1}{m_0} = \arctg \frac{\bar{N}}{\bar{M}_0}$ – широта вектора усилий;

$\beta = \arctg \frac{m_{x,0}}{m_{y,0}} = \arctg \frac{\bar{M}_{x,0}}{\bar{M}_{y,0}}$ – азимут вектора усилий;

$\bar{M}_0 = \sqrt{\bar{M}_{x,0}^2 + \bar{M}_{y,0}^2}$ – суммарный момент на опорах;

$m_0 = \sqrt{m_{x,0}^2 + m_{y,0}^2}$ – суммарный относительный эксцентриситет на опорах;

$m_{x,0} = \frac{\bar{M}_{x,0}}{\bar{N}}, m_{y,0} = \frac{\bar{M}_{y,0}}{\bar{N}}$ – относительные эксцентриситеты.

Очевидно, что поверхность устойчивости замкнута, и начало координат находится внутри поверхности устойчивости. Очевидно также, что по мере нагружения, т.е. при увеличении параметра $\bar{F}$, отрезок, проведенный из начала координат в точку с координатами $(\bar{N}, \bar{M}_{x,0}, \bar{M}_{y,0})$, пересечет поверхность устойчивости в точке $(\bar{N}_{\text{lim}}, \bar{M}_{x,0,\text{lim}}, \bar{M}_{y,0,\text{lim}})$, которую обозначим $\bar{F}_{\text{lim}}$. Следовательно, проверку устойчивости можем выполнить по формуле

$$K_u^b = \frac{\bar{F}}{\bar{F}_{\text{lim}}} = \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{\text{lim}}} \leq 1, \quad (3.51)$$

где $\bar{F}_{\text{lim}} = \sqrt{\bar{N}_{\text{lim}}^2 + \bar{M}_{x,0,\text{lim}}^2 + \bar{M}_{y,0,\text{lim}}^2}$ – расстояние от начала координат до той точки на поверхности устойчивости, которая имеет ту же широту α и азимут β , что и действующие опорные усилия.

Для практического использования проверка устойчивости может быть записана в традиционном виде

$$K_u^b = \frac{N}{\varphi A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (3.52)$$

где N – действующая сжимающая продольная сила;

A_g – площадь полного (нередуцированного) поперечного сечения;

$\varphi = \bar{N}_{\text{lim}} = f(m_{x,0}, m_{y,0})$ – коэффициент устойчивости, который зависит от параметров сечения, рассматриваемой формы потери устойчивости, и от значений опорных эксцентриситетов продольной силы.

Для нахождения координат точки $\bar{F}_{\text{lim}}$ на поверхности устойчивости стержня, поперечное сечение которого имеет две оси симметрии, необходимо численными методами решить систему нелинейных уравнений относительно параметров деформированного состояния k_N и k_{M_x}

$$\begin{cases} \alpha(k_N, k_{M_x}) = \alpha_{\text{req}}, \\ \beta(k_N, k_{M_x}) = \beta_{\text{req}}, \end{cases} \quad (3.53)$$

где $\alpha(k_N, k_{M_x})$ и $\beta(k_N, k_{M_x})$ – широта и азимут, рассчитанные для точки $\bar{F}_{\text{lim}} = f(k_N, k_{M_x})$ на поверхности устойчивости, координаты которой зависят от значений параметров k_N и k_{M_x} ;

α_{req} и β_{req} – широта и азимут, рассчитанные для опорных эксцентриситетов приложения нагрузки $m_{x,0}, m_{y,0}$.

Система (3.53) решается аналогично системе (2.65) (см. §2.4.3).

Для нахождения координат точки $\bar{F}_{\text{lim}}$ на поверхности устойчивости стержня, поперечное сечение которого имеет одну ось симметрии, необходимо численными методами решить систему нелинейных уравнений относительно параметров деформированного состояния k_N и θ

$$\begin{cases} \alpha(k_N, \theta) = \alpha_{\text{req}}, \\ \beta(k_N, \theta) = \beta_{\text{req}}, \end{cases} \quad (3.54)$$

где $\alpha(k_N, \theta)$ и $\beta(k_N, \theta)$ – широта и азимут, рассчитанные для точки $\bar{F}_{\text{lim}} = f(k_N, \theta)$ на поверхности устойчивости, координаты которой зависят от значений параметров k_N и θ ;

α_{req} и β_{req} – широта и азимут, рассчитанные для опорных эксцентриситетов приложения нагрузки $m_{x,0}$, $m_{y,0}$.

Система (3.54) решается аналогично системе (2.73) (см. §2.4.4).

§3.5. Аналитическое решение задачи устойчивости элемента ЛСТК

Исследуя устойчивость обратным численно-аналитическим методом, мы использовали аналитическое решение задачи устойчивости и обратный численный метод «Сечение», с помощью которого определяли в наиболее нагруженном сечении стержня реальные усилия, полные «деформационные» и «фиктивные» усилия, необходимые для учета снижения жесткости стержня в следствие потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения (редукции сечения).

Установив аналитическую связь между реальными и полными усилиями, получим аналитическое решение задачи устойчивости элемента ЛСТК.

§3.5.1. Устойчивость по изгибной форме

При решении задачи устойчивости по плоской форме необходимо для заданного опорного эксцентриситета m_x (индекс «0» здесь и далее опустим, предполагая все относительные эксцентриситеты, о которых будет идти речь, опорными) найти значения четырех неизвестных (т.к. либо $M_y = M_y^* = 0$, либо $M_x = M_x^* = 0$).

При решении задачи устойчивости по изгибной форме в плоскости большей жесткости усилия связаны соотношениями (2.42), (3.46) и (3.47), которые вместе образуют систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N}{r_z AR_y} + \frac{M_x}{r_x W_x R_y} = 1, \\ \frac{N^*}{AR_y} + \frac{M_x^*}{W_x R_y} = 1, \\ m_x + \Delta m_x = \frac{A}{W_x} \times \frac{1}{N \cdot K_{d,x}} \left(M_x - M_{x,f} (K_{d,x} - 1) \right), \end{array} \right. \quad (3.55)$$

где $r_z = A_{ef} / A$ – коэффициент редукции предельного значения продольной силы (редуцированная площадь поперечного сечения A_{ef} и координата центра тяжести редуцированного сечения в осях полного сечения Δy_N определяются при равномерном распределении сжимающих напряжений $\sigma = R_y$ по сечению);

$r_x = W_{ef,x} / W_x$ – коэффициент редукции предельного значения изгибающего момента M_x ($W_{x,ef}$ – момент сопротивления редуцированного сечения, определяемый при действии только изгибающего момента);

$m_x = \frac{M_x^0}{N} \times \frac{A}{W_x}$ – относительный эксцентриситет продольной силы;

$\Delta m_x = \pm |\Delta y_N| \frac{A}{W_x}$ – дополнительный относительный эксцентриситет от смещения центра тяжести редуцированного сечения (знак определяется по отношению к основному эксцентриситету);

$K_{d,x} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{N/N_{cr,x}}{1 - N/N_{cr,x}}$ – деформационный коэффициент по (3.19);

$N_{cr,x} = \pi^2 EI_{x,g} / l_{ef,x}^2$ – критическая сила по Эйлеру;

$M_x > (m_x + \Delta m_x) N \frac{W_x}{A}$ – реальный изгибающий момент в наиболее нагруженном сечении стержня из расчета по деформированной схеме при приложении к нему продольной силы с эксцентриситетом $m_x + \Delta m_x$ на концах.

Система (3.55) должна быть дополнена четвертым уравнением, чтобы определить все неизвестные усилия: N , N^* , M_x и M_x^* (фиктивные усилия определим по (3.42)). Дополним систему следующим допущением

$$N = r_z N^* . \quad (3.56)$$

Реальная связь N и N^* – нелинейная, но при $N^* = AR_y$ имеем $N = r_z AR_y$, а при $N^* = 0$ имеем $N \approx 0$. Кроме того, чем меньше влияние редукиции сечения, тем ближе аппроксимация (3.56) к реальной зависимости, а в отсутствии редукиции ($r_x = 1$, $r_z = 1$) аппроксимация (3.56) соответствует первому уравнению (3.42) (где $N_f = 0$). Наконец, для редуцированных сечений продольная сила N по (3.56) меньше действительной, поэтому допущение принято в запас прочности.

Систему (3.55) с учетом (3.56) можем решить относительно коэффициента устойчивости $\varphi_e = \frac{N}{AR_y}$, при этом получаем квадратное уравнение

$$a \cdot \varphi_e^2 + b \cdot \varphi_e + d = 0 , \quad (3.57)$$

где a , b , d – коэффициенты, формулы которых приведены в примечаниях к (5.7) в пятой главе диссертации.

Напомним, что в действующем своде правил [1] формула для расчета коэффициента устойчивости при центральном сжатии также получена из решения квадратного уравнения, что отмечено в работе [103].

При расчете устойчивости по изгибной форме в плоскости меньшей жесткости получим аналогичный результат. При расчете спаренных в двутавр U-, C-, Σ -профилей в плоскости меньшей жесткости, как и в задачах прочности, необходимо учитывать дополнительный эксцентриситет Δx_H .

§3.5.2. Устойчивость по изгибно-крутильной форме

При решении задачи устойчивости по изгибно-крутильной форме изгибающий момент M_x , действующий в плоскости большей жесткости, в соответствии с общепринятым подходом принимаем распределенным равномерно. Усилия при этом связаны соотношениями (2.42), (3.46) (только для момента M_y) и (3.47), ко-

торые вместе с предположением о равномерном распределении момента M_x образуют систему

$$\begin{cases} \frac{N}{r_z A R_y} + \frac{M_x}{r_x W_x R_y} + \frac{M_y}{r_y W_y R_y} = 1, \\ \frac{N^*}{A R_y} + \frac{M_x^*}{W_x R_y} + \frac{M_y^*}{W_y R_y} = 1, \\ m_x + \Delta m_x = \frac{M_x}{N} \times \frac{A}{W_x}, \\ m_y + \Delta m_y = \frac{A}{W_y} \times \frac{1}{N \cdot K_{d,y}} \left(M_y - M_{y,f} (K_{d,y} - 1) \right), \end{cases} \quad (3.58)$$

где $r_y = W_{ef,y} / W_y$ – коэффициент редукции предельного значения изгибающего момента M_y ($W_{ef,y}$ – момент сопротивления редуцированного сечения, определяемый при действии только изгибающего момента);

$m_y = \frac{M_y^o}{N} \times \frac{A}{W_y}$ – относительный эксцентриситет на опоре из расчета по недеформированной схеме;

$\Delta m_y = (|\Delta x_H| \pm |\Delta x_N|) \frac{A}{W_y}$ – дополнительный относительный эксцентриситет

от смещения центра тяжести редуцированного сечения;

Δx_N – координата центра тяжести редуцированного сечения в осях полного сечения при равномерном распределении по сечению сжимающих напряжений $\sigma = R_y$, знак для которой выбирается по отношению к основному эксцентриситету;

Δx_H – дополнительный эксцентриситет для расчета «двутаковых» ЛСТК;

$M_y > (m_y + \Delta m_y) N \frac{W_y}{A}$ – реальный изгибающий момент в наиболее нагруженном сечении стержня из расчета по деформированной схеме при приложении к нему продольной силы с эксцентриситетами $m_x + \Delta m_x$ и $m_y + \Delta m_y$ на концах.

Для решения системы (3.58) относительно продольной силы удобно будет записать деформационный коэффициент (3.38) в следующем виде

$$K_{d,y} = \frac{a_3 \bar{N}^3 + a_2 \bar{N}^2 + a_1 \bar{N} + a_0}{b_2 \bar{N}^2 + b_1 \bar{N} + b_0}. \quad (3.59)$$

где a_i , b_j – коэффициенты, формулы для расчета которых приведены в примечаниях к (5.9) в пятой главе работы.

Система (3.58) должна быть дополнена двумя уравнениями, чтобы определить все неизвестные усилия: N , N^* , M_x , M_x^* , M_y и M_y^* (фиктивные усилия определим по (3.42)). Примем допущение (3.56) в качестве пятого уравнения системы. Дополним систему также следующим допущением

$$M_x = r_x M_x^*. \quad (3.60)$$

Реальная связь M и M_x^* – нелинейная, но при $M_x^* = W_x R_y$ имеем $M_x = r_x W_x R_y$, а при $M_x^* = 0$ имеем $M_x = 0$. Кроме того, чем меньше влияние редукции сечения, тем ближе аппроксимация (3.60) к реальной зависимости, а в отсутствии редукции ($r_x = 1$, $r_y = 1$, $r_z = 1$) аппроксимация (3.60) соответствует второму уравнению (3.42) (где $M_{x,f} = 0$). Наконец, для редуцированных сечений изгибающий момент M_x по (3.60) меньше действительного, поэтому допущение принято в запас прочности.

Систему (3.58) с учетом (3.56) и (3.60) можем решить относительно коэффициента устойчивости $\varphi_{cy} = \frac{N}{AR_y}$, при этом получаем уравнение 4-ой степени

$$c_4 \cdot \varphi_{cy}^4 + c_3 \cdot \varphi_{cy}^3 + c_2 \cdot \varphi_{cy}^2 + c_1 \cdot \varphi_{cy} + c_0 = 0, \quad (3.61)$$

где c_k – коэффициенты, формулы для расчета которых приведены в примечаниях к (5.9) в пятой главе работы.

Из всех корней (3.61) принимаем наименьший положительный действительный корень в качестве расчетного значения коэффициента устойчивости φ_{cy} .

§3.6. Выводы по главе

1. Представлено аналитическое решение деформационной задачи по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам потери устойчивости тонкостенного стержня с нередуцированным сечением в безразмерных параметрах.
2. Снижение жесткости и прочности деформируемого элемента ЛСТК за счет фактической редукции поперечного сечения в соответствии с методом упругих решений учитывается фиктивным догрузением.
3. Аналитическое решение задачи устойчивости (расчёт на прочность по деформированной схеме) в обратной постановке позволяет для заданного предельного деформированного состояния в наиболее нагруженном поперечном сечении элемента ЛСТК определить эксцентриситеты сжимающей силы на опорах.
4. Разработан метод определения параметров распределения деформаций в наиболее нагруженном сечении элемента ЛСТК, соответствующих сжатию с заданными опорными эксцентриситетами, который позволяет выполнить расчет устойчивости с учетом фактической редукции за считанное количество итераций.
5. При использовании обратного численно-аналитического метода расчета устойчивости численные методы используются только для установления зависимостей между реально действующими в наиболее нагруженном поперечном сечении усилиями и фиктивными – компенсирующими редукцию. Используя аппроксимации этих зависимостей, получены системы уравнений, которые решены аналитически относительно коэффициентов устойчивости.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК

§4.1. Численные эксперименты

Задача устойчивости стержневого элемента ЛСТК является комплексной. Рассматривая стержень как тонкостенную оболочку, можем обнаружить множество форм потери устойчивости, которые принято различать по длине полуволны. В настоящей работе для учета потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения используется нормативная методика определения редуцированных геометрических характеристик поперечного сечения, разработанная на основе теоретических и экспериментальных исследований несущей способности как пластинок, так и стержней. При этом для проверки общей устойчивости используются усовершенствованный численно-аналитический метод, а также разработанный на его основе новый аналитический метод.

Покажем, что усовершенствованный численно-аналитический метод позволяет достаточно точно определить предельную силу по критерию устойчивости стержня, сечение которого ослаблено за счет потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения. Для этого выполним верификационные расчеты методом конечных элементов (МКЭ), рассматривая стержневой элемент ЛСТК в качестве тонкостенной оболочки.

Учет потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения при использовании оболочечных моделей МКЭ, как правило, выполняют путем создания начальных несовершенств по собственным формам. При этом и форма несовершенств, и амплитуда в действительной являются случайными величинами. Стоит отметить также, что при разработке нормативной методики определения редуцированных геометрических характеристик экспериментальные данные подвергались статистической обработке и аппроксимации. Из этого следует, что не существует способа задания таких начальных несовершенств, при которых стержень будет иметь в точности ту же жесткость и несущую способность, что при

использовании нормативной методики, а значит, анализ точности численно-аналитического метода проверки общей устойчивости при использовании такого подхода к учету местной устойчивости и устойчивости формы сечения в расчетах МКЭ затруднителен.

Для анализа точности численно-аналитического метода проверки общей устойчивости необходимо использовать в расчетах МКЭ нормативную модель редуцирования геометрических характеристик поперечного сечения. Те части пластин, которые в соответствии с нормативным методом исключаются из работы по восприятию сжимающих напряжений, должны и в расчетной схеме МКЭ исключаться из работы, при этом эти части пластин должны продолжать передачу нормальных напряжений вдоль контура поперечного сечения, а также передачу касательных напряжений. Это возможно при использовании ортотропной модели оболочки.

§4.1.1 Постановка задачи

Выполним расчеты в следующей последовательности:

- обратным численно-аналитическим методом рассчитаем предельную продольную силу, воспринимаемую стержнем по критерию устойчивости, для набора различных гибкостей стержня и эксцентриситета приложения продольной силы; в ходе расчета определяется схема редукции в наиболее нагруженном поперечном сечении;
- выполним для каждого полученного результата верификационный расчет методом конечных элементов (МКЭ) в «прямой» постановке: на торцах стержня, имеющего аналогичную гибкость, приложим полученные из расчета «обратным» численно-аналитическим методом усилия с теми же эксцентриситетами, используя в расчетной схеме ослабление, соответствующее схеме редукции в наиболее нагруженном поперечном сечении;
- из МКЭ расчета получим величину прогиба в двух плоскостях, что позволяет рассчитать действительные деформационные коэффициенты и интегральные усилия в наиболее нагруженном сечении;

- сопоставляя деформационные коэффициенты и интегральные усилия, полученные «обратным» численно-аналитическим методом и «прямым» расчетом МКЭ, оценим точность первого по отношению ко второму.

Используем для расчетов три типа поперечных сечений, наиболее часто встречающихся в практике проектирования:

- спаренные швеллеры;
- спаренные С-профили;
- спаренные Σ -профили (сигма-профили).

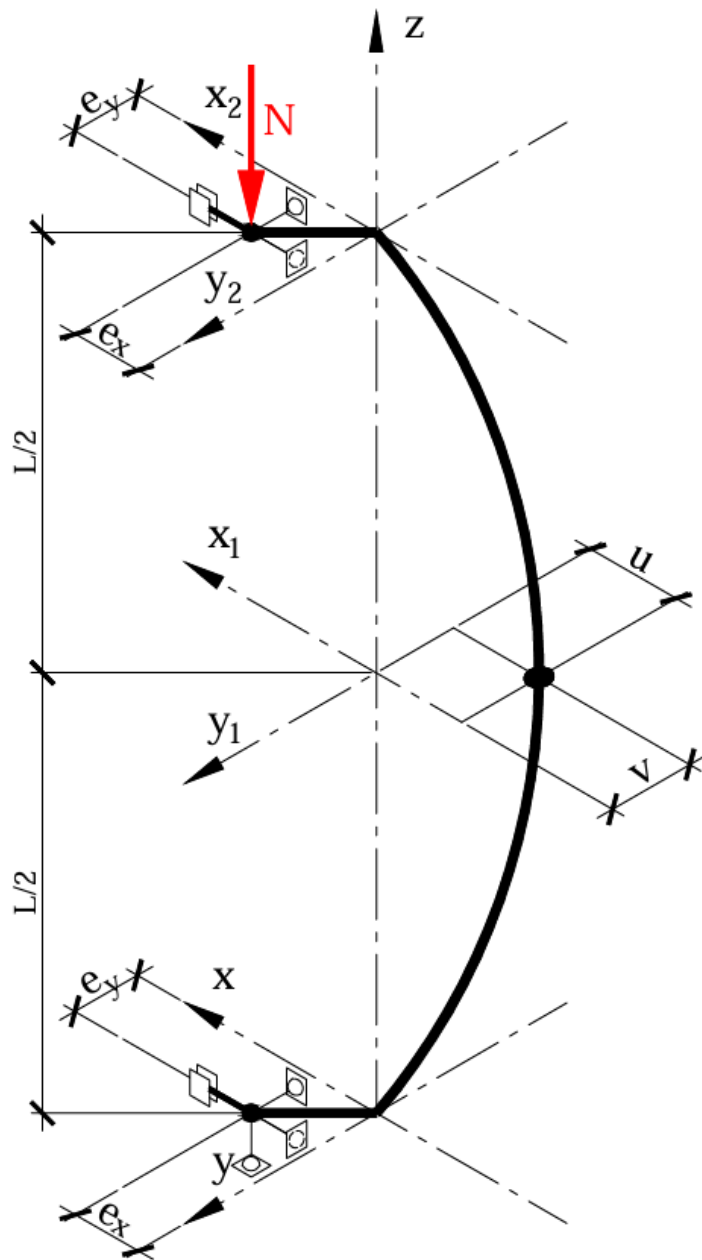
В таблице 4.1 приведены основные исходные данные для выполнения расчетов.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета

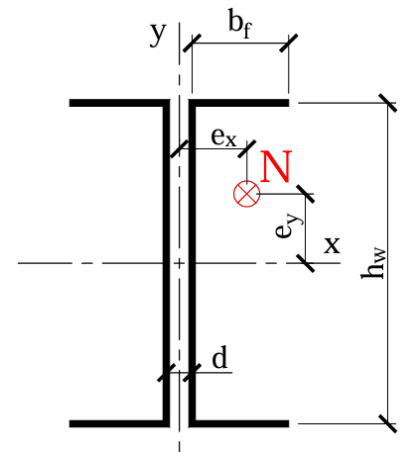
Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение		
			Швеллеры	С-профили	Сигма-профили
Толщина профиля	t	мм	1	1	1
Зазор между осевыми линиями стенок профиля	d	мм	5	5	5
Высота стенки профиля	h_w	мм	$\bar{\lambda}_w t \sqrt{\frac{E}{R_y}}$		
Ширина полки профиля	b_f	мм	$\alpha_f h_w$	$\alpha_f h_w$	$\alpha_f h_w$
Высота отгиба полки	h_c	мм	–	$\alpha_c b_f$	$\alpha_c b_f$
Длина меньшего основания трапеции усиления стенки	h_1	мм	–	–	$\alpha_1 h_2$
Длина большего основания трапеции усиления стенки	h_2	мм	–	–	$\alpha_2 h_w$
Высота трапеции усиления стенки	k	мм	–	–	$\alpha_k h_w$
Гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	–	4; 2	6; 3	8; 4
Параметр формы сечения	α_f	–	0,25; 0,3	0,4	0,3
Параметры формы отгиба	α_c	–	–	0,3	0,2
Параметры формы усиления 1	α_1	–	–	–	0,4
Параметры формы усиления 2	α_2	–	–	–	0,25
Параметры формы усиления 3	α_k	–	–	–	0,3
Предел текучести стали	R_y	МПа	220	330	330
Модуль упругости стали	E	ГПа	206	206	206

Схема загрузки и поперечные сечения показаны на рисунке 4.1.

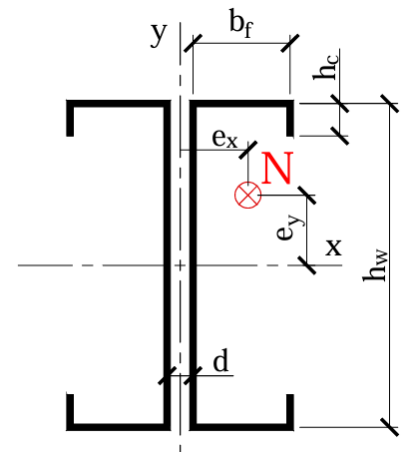
а)



б)



в)



г)

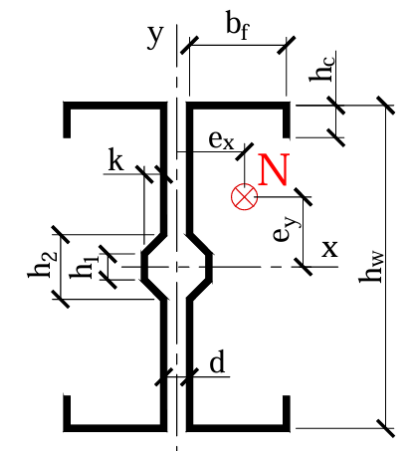


Рисунок 4.1 – Схемы: а) загрузка стержня; б) сечение спаренных швеллеров; в) сечение спаренных С-профилей; г) сечение спаренных Σ -профилей.

Рассматриваем три варианта потери устойчивости:

- устойчивость в плоскости большей жёсткости по изгибной форме ($\varphi_{e,x}$);
- устойчивость в плоскости меньшей жёсткости по изгибной форме ($\varphi_{e,y}$);
- устойчивость по изгибно-крутильной форме (φ_{cy}).

§4.1.2 Численно-аналитическое решение

Численно-аналитическое решение выполнено в соответствии с методом, изложенным в главе 3. Решение выполнено в безразмерных параметрах. Сечение задано гибкостью стенки и набором параметров формы. В качестве исходных данных для решения задачи устойчивости приняты относительные эксцентриситеты нагрузки на опорах в двух плоскостях и гибкость стержня (для изгибной формы потери устойчивости – в плоскости эксцентриситета нагрузки, для изгибно-крутильной формы – в плоскости меньшей жесткости).

Продольная сила и параметры редукиции наиболее нагруженного поперечного сечения, соответствующие предельному состоянию по критерию устойчивости, сохранены и переданы в Ansys Mechanical в безразмерном виде (коэффициент устойчивости и относительная эффективная ширина в начале и конце каждой пластинки, а также коэффициенты редукиции по толщине для элементов усиления).

§4.1.3 Численное решение методом конечных элементов

Численное решение методом конечных элементов выполнено в программе Ansys Mechanical. Стержень длиной L смоделирован плоскими четырех-узловыми конечными элементами. Модель материала для рабочей части сечения – билинейная с изотропным упрочнением (модуль деформации на площадке текучести составляет одну тысячную модуля упругости). Решение задачи произведено с учётом геометрической нелинейности (расчет по деформированной схеме с учетом больших перемещений).

Редуцированные по толщине и ширине части пластин смоделированы конечными элементами исходной толщины с ортотропными механическими свойствами: модуль упругости в направлении продольной оси стержня уменьшен (для редукиции по толщине – пропорционально коэффициенту редукиции по толщине « χ », для редукиции по ширине – в тысячу раз, что обеспечивает практически полное выключение из работы), при этом модуль упругости в ортогональном направлении и модуль сдвига имеют исходные значения.

Максимальный размер конечного элемента путем анализа сходимости результатов при сгущении сетки конечных элементов принят равным

$$s_{max} = \min\left(\frac{b_f}{8}, \frac{h_w}{20}, \frac{h_c}{3}\right). \quad (4.1)$$

На рисунках 4.2–4.4 показаны примеры построенной сетки конечных элементов с цветовым отображением назначенных материалов.

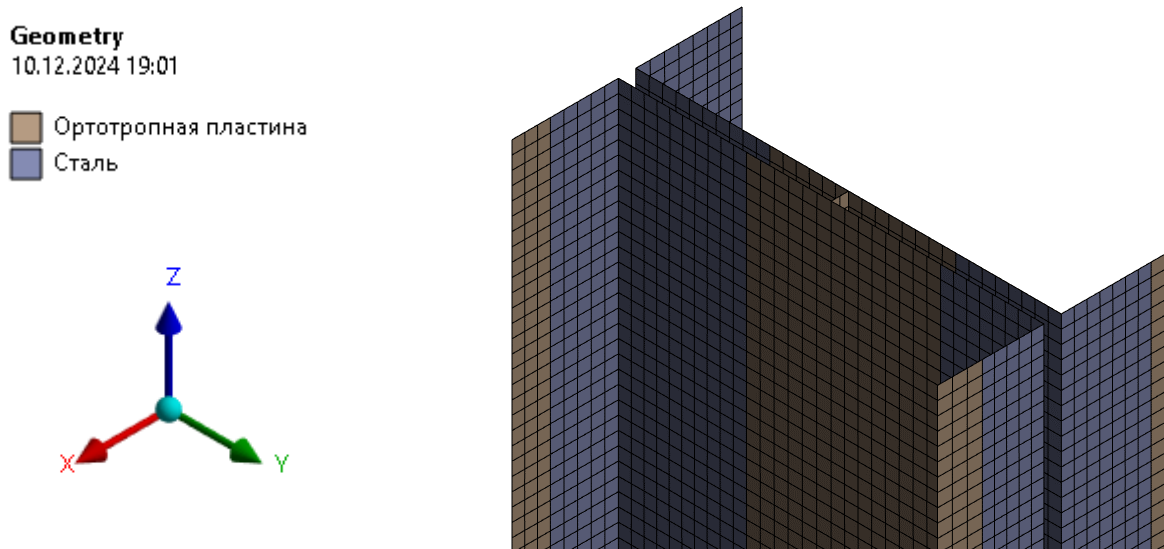


Рисунок 4.2 – Сетка конечных элементов спаренных швеллеров при $\alpha_f = 0,25$

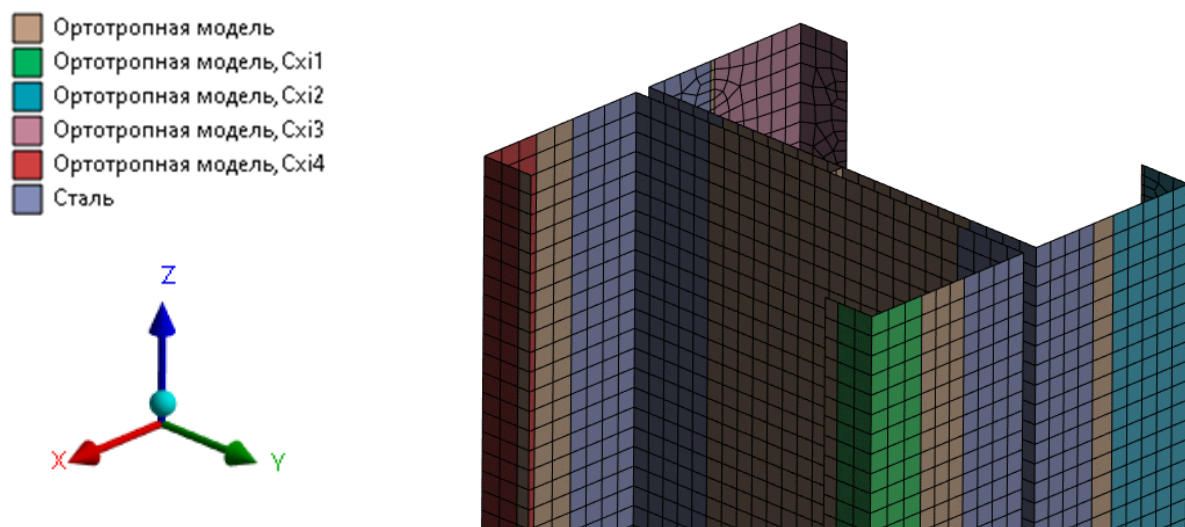


Рисунок 4.3 – Сетка конечных элементов спаренных С-профилей

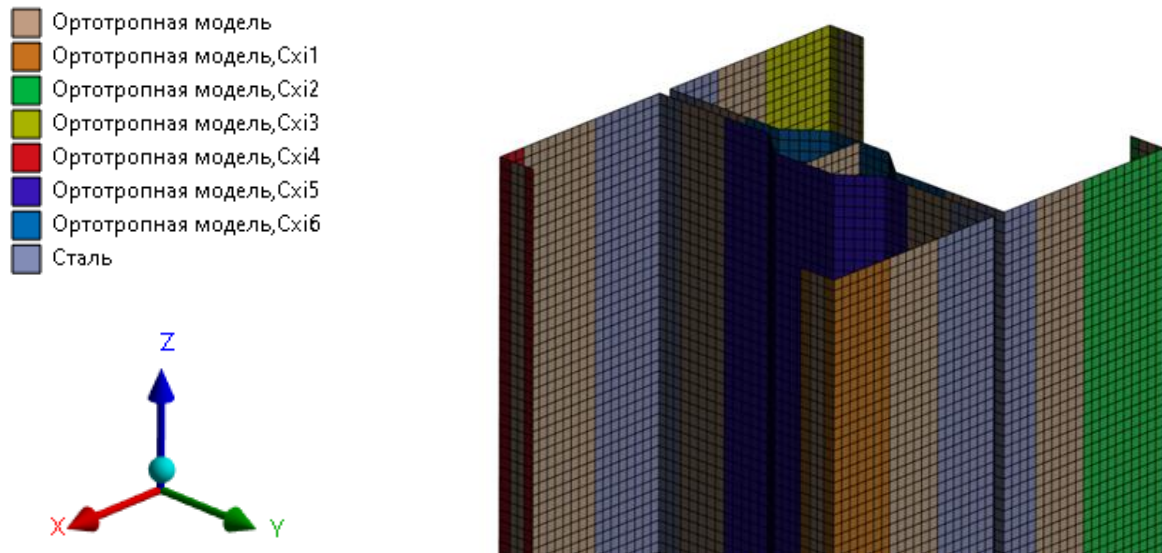


Рисунок 4.4 – Сетка конечных элементов спаренных Сигма-профилей

Узлы, лежащие в плоскости $z = 0$, при помощи инструмента «Remote Displacement» с настройкой «Deformable» связаны с узлом $(x_e, y_e, 0)$, который закреплен от перемещений во всех направлениях и от поворотов вокруг оси «z». Узлы, лежащие в плоскости $z = L$ аналогично связаны с узлом (x_e, y_e, L) , который закреплен от перемещений вдоль осей «x» и «y», а также от поворотов вокруг оси «z». Создаваемые программой ограничения на перемещения допускают деформацию опорных сечений, что соответствует предпосылкам, принятым при разработке численно-аналитического метода расчета устойчивости. Продольная сила приложена в точку (x_e, y_e, L) и направлена против оси «z».

Для того, чтобы ветви спаренных сечений работали совместно, середины их стенок соединяются в расчетной модели посредством продольного ребра, которое выключено из работы по восприятию нормальных напряжений вдоль продольной оси стержня. Узлы, лежащие на линии $x = y = 0$, при расчете устойчивости по плоской форме при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости дополнительно закреплены от перемещений вдоль оси «x» и поворотов вокруг оси «z».

Расчетные схемы с отображением граничных условий для расчета по изгибно-крутильной форме показаны на рисунках 4.5–4.7.

- A** Опора $z = L$
B Нагрузка: 20231 N
C Опора $z = 0$

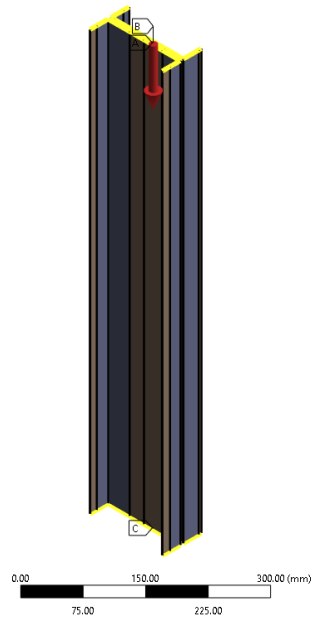
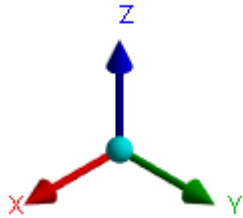


Рисунок 4.5 – Расчетная схема спаренных швеллеров с параметрами
 $\bar{\lambda}_w = 4$, $\alpha_f = 0,25$, $\bar{\lambda}_y = 2,0$, $m_x = 0,4$, $m_y = m_{y,сл} = 0,14$, $\bar{N} = 0,250$

B: Static Structural

Static Structural

Time: 1. s

13.12.2024 14:36

- A** Опора $z = 0$
B Опора $z = L$
C Нагрузка: 54665 N

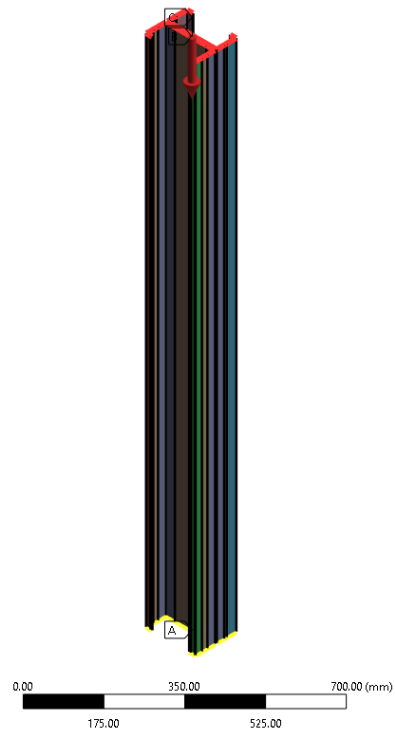
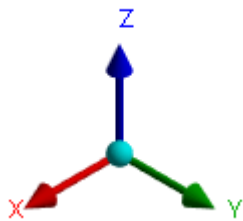


Рисунок 4.6 – Расчетная схема спаренных С-профилей с параметрами
 $\bar{\lambda}_w = 6$, $\alpha_f = 0,4$, $\bar{\lambda}_y = 2,0$, $m_x = 0,1$, $m_y = m_{y,сл} = 0,14$, $\bar{N} = 0,271$

B: Static Structural

Static Structural

Time: 1. s

23.01.2026 20:29

- A** Плоскость z=0
B Плоскость z=L
C Нагрузка: 67512 N

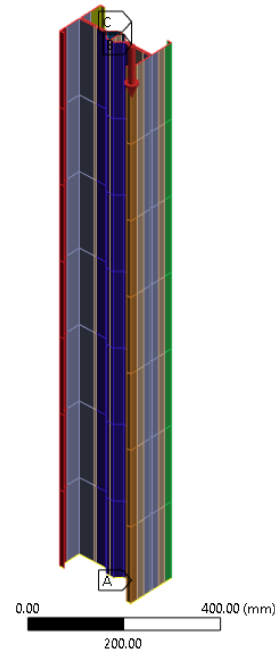
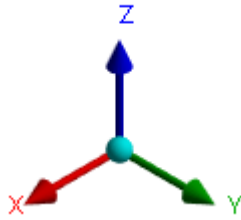


Рисунок 4.7 – Расчетная схема спаренных Сигма-профилей с параметрами

$$\bar{\lambda}_w = 8, \alpha_f = 0,3, \bar{\lambda}_y = 2,0, m_x = 0,8, m_y = m_{y,сл} = 0,14, \bar{N} = 0,287$$

§4.1.4 Результаты

На рисунках 4.8–4.10 показаны примеры результатов расчетов устойчивости по изгибно-крутильной форме.

Из расчета получены максимальные значения прогибов оси стержня $u = -\Delta x$, $v = -\Delta y$, где Δx и Δy – перемещения вдоль осей x и y соответственно. Коэффициенты увеличения деформаций (см. формулы (3.18) и (3.38) главы 3) рассчитаны по формулам

$$K_{dx,a} = \frac{y_e + v}{y_e}, \quad (4.2)$$

$$K_{dy,a} = \frac{x_e + u}{x_e}. \quad (4.3)$$

Коэффициенты использования прочности наиболее нагруженного поперечного сечения по требованиям действующих норм рассчитываются по формуле

$$K_u = \frac{\bar{N}}{r_z} + \frac{\bar{M}_x}{r_x} + \frac{\bar{M}_y}{r_y} = \bar{N} \cdot \left(\frac{1}{r_z} + K_{d,x} \frac{m_x}{r_x} + K_{d,y} \frac{m_y}{r_y} \right). \quad (4.4)$$

a)

B: Static Structural

Normal Stress

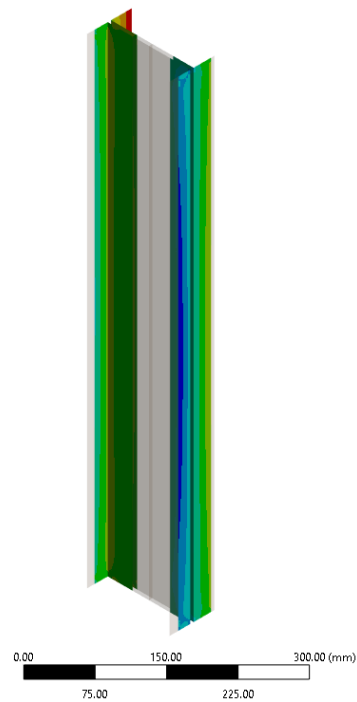
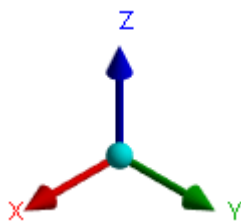
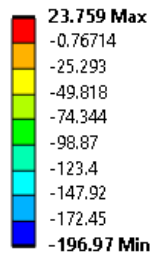
Type: Normal Stress(Z Axis) - Middle

Unit: MPa

Global Coordinate System

Time: 1. s

12.12.2024 17:11



б)

B: Static Structural

v

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1. s

18.12.2024 15:32

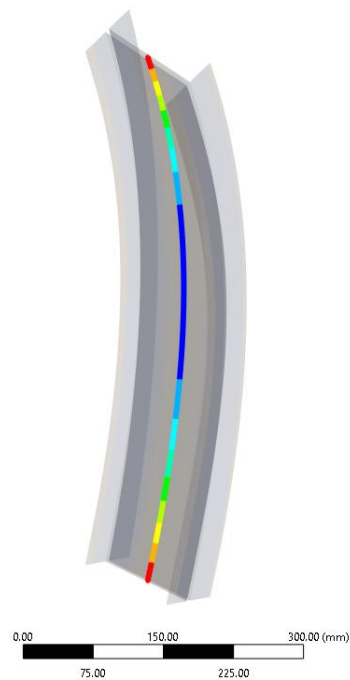
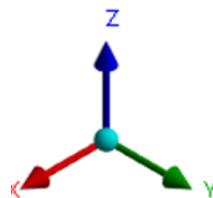
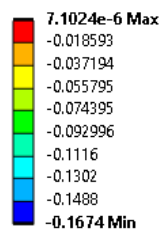


Рисунок 4.8 – Результаты расчета спаренных швеллеров с параметрами

$$\bar{\lambda}_w = 4, \alpha_f = 0,25, \bar{\lambda}_y = 2,0, m_x = 0,4, m_y = m_{y,сл} = 0,14, \bar{N} = 0,250:$$

а) напряжения σ_z ; б) перемещения v оси стержня

a)

B: Static Structural

Normal Stress 3

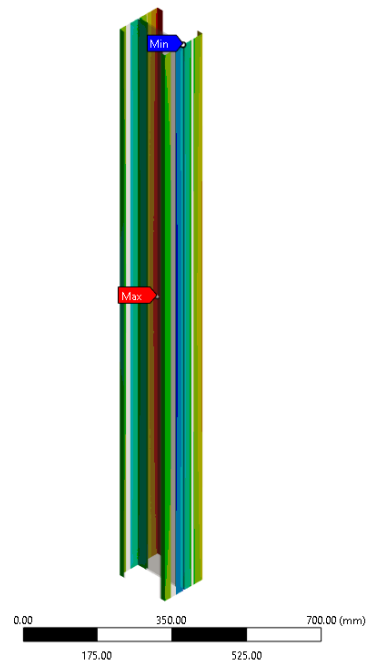
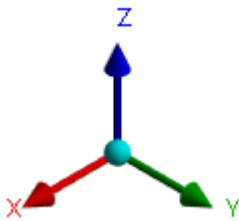
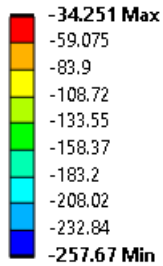
Type: Normal Stress(Z Axis) - Middle

Unit: MPa

Global Coordinate System

Time: 1 s

13.12.2024 14:53



б)

B: Static Structural

v

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1 s

13.12.2024 14:53

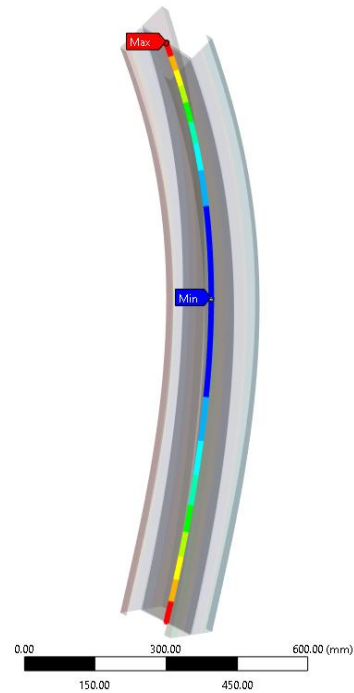
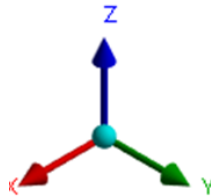
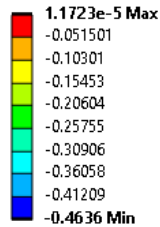


Рисунок 4.9 – Результаты расчета спаренных С-профилей с параметрами

$$\bar{\lambda}_w = 6, \alpha_f = 0,4, \bar{\lambda}_y = 2,0, m_x = 0,1, m_y = m_{y,cl} = 0,14, \bar{N} = 0,271:$$

а) напряжения σ_z ; б) перемещения v оси стержня

a)

B: Static Structural

Normal Stress

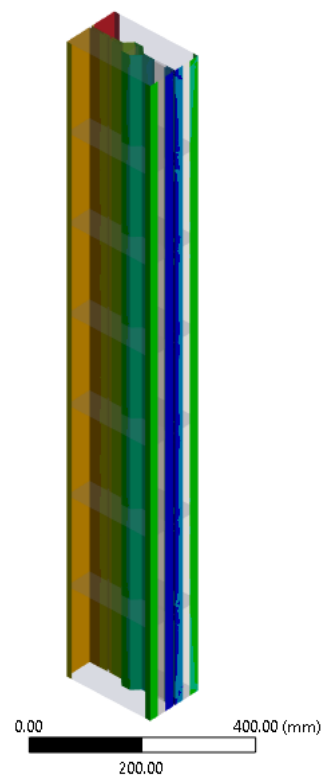
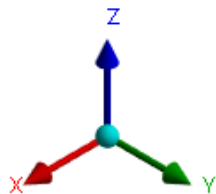
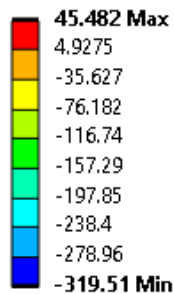
Type: Normal Stress(Z Axis) - Middle

Unit: MPa

Global Coordinate System

Time: 1 s

23.01.2026 20:13



б)

B: Static Structural

v

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1 s

23.01.2026 20:18

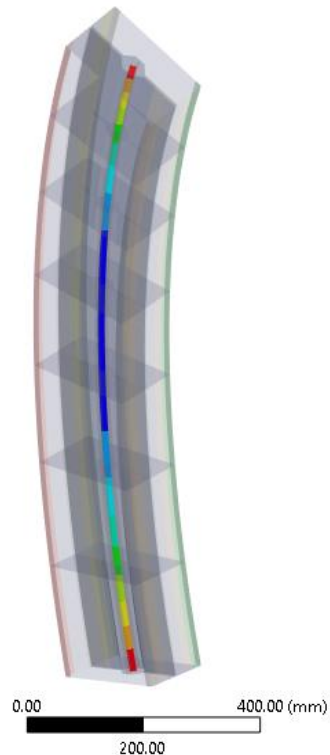
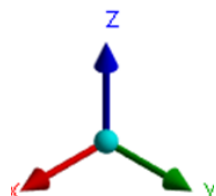
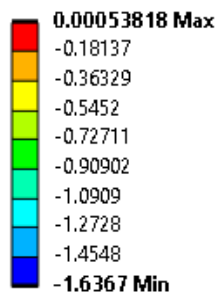


Рисунок 4.10 – Результаты расчета спаренных Сигма-профилей с параметрами

$$\bar{\lambda}_w = 8, \alpha_f = 0,3, \bar{\lambda}_y = 2,0, m_x = 0,8, m_y = m_{y,cl} = 0,14, \bar{N} = 0,287:$$

а) напряжения σ_z ; б) перемещения v оси стержня

Деформационные коэффициенты и коэффициенты использования прочности в наиболее нагруженном поперечном сечении из численно-аналитического расчета и расчета методом конечных элементов сравниваются по формуле

$$\Delta = \frac{P_a - P}{P_a} \%, \quad (4.5)$$

где P – результат, полученный численно-аналитически;

P_a – результат, полученный в Ansys Mechanical.

Результаты расчётов для различных параметров сечения α_f , $\bar{\lambda}_w$, параметров стержня $\bar{\lambda}_x$, $\bar{\lambda}_y$ и параметров нагрузки $\bar{N}$, m_x , m_y сведены в таблицы А.1-А.9 приложения А.

Как видно из представленных результатов, коэффициенты деформации K_{dx} и K_{dy} , рассчитанные численно-аналитически, хорошо согласуются с результатами расчета в ANSYS.

При расчете устойчивости спаренных швеллеров с большой гибкостью по плоской форме при сжатии с малым эксцентриситетом в плоскости большей жесткости, когда теоретическое значение деформационного коэффициента велико (скажем, $K_{d,x} > 5$), возникает наибольшая разница $\Delta K_{d,x}$, при чем теоретические значения $K_{d,x}$ оказываются выше, что связано с использованием в теоретическом решении предпосылки о малости деформаций. При этом отклонения ΔK_u меньше и составляют, как правило, менее 1%. Таким образом, результаты численно-аналитического расчета незначительно отклоняются в сторону запаса устойчивости.

При расчете устойчивости спаренных швеллеров по плоской форме при сжатии с эксцентриситетом в плоскости меньшей жесткости результаты несколько отличаются: деформационные коэффициенты, полученные по результатам расчета методом конечных элементов, оказываются незначительно выше теоретических значений, что связано с деформацией контура поперечного сечения, возникающей вследствие принятого способа соединения ветвей в расчетной модели (см. рисунок 4.11). Тем не менее среднеквадратические значения $\Delta K_{d,y}$ и ΔK_u составляют менее 1%.

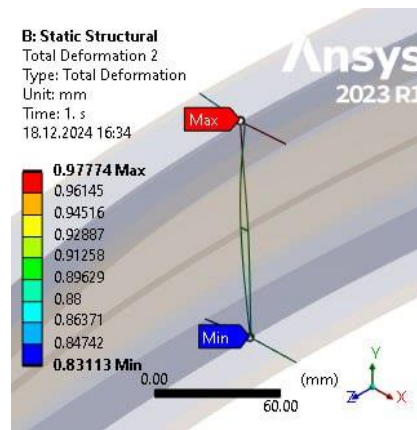


Рисунок 4.11 – Деформация контура поперечного сечения при расчете устойчивости в плоскости меньшей жесткости

При расчете устойчивости спаренных швеллеров по изгибно-крутильной форме имеет место значительное отклонение деформационных коэффициентов $K_{d,y}$ для стержней большой гибкости $\bar{\lambda}_y \geq 4$, сжатых с эксцентриситетом $m_x \geq 1$, при чем теоретическое значение выше, что связано с использованием в теоретическом решении предпосылки о малом влиянии угла поворота θ на уменьшение изгибающего момента в плоскости большей жесткости. Тем не менее отклонения по величине коэффициента использования прочности значительно меньше и для практически значимых результатов ($\bar{\lambda}_y < 4$) не превышают 1%.

Результаты расчетов устойчивости для спаренного С-профиля в целом аналогичны результатам расчета швеллеров, но отклонения деформационных коэффициентов для некоторых сочетаний гибкости и относительного эксцентриситета выше, чем при аналогичном нагружении швеллеров. Связано это с деформацией контура поперечного сечения, в особенности в зоне усиления полки отгибом. Так как негативное влияние деформаций контура поперечного сечения уже учтено коэффициентами редукции по толщине « χ », то связанные с этим дополнительные отклонения деформационных коэффициентов следует оценивать как погрешность численного расчета методом конечных элементов.

Негативное влияние деформаций контура поперечного сечения, которые проявлялись и при расчете швеллеров, и при расчете С-профилей, еще сильнее сказывается на результатах расчета Сигма-профилей за счет использования стенок

большой гибкости. С целью исключить влияние деформаций контура поперечного сечения, которые уже учтены коэффициентами редукции по толщине « χ », расчетная схема Сигма-профилей дополнена поперечными ребрами с нулевой изгибной жесткостью как показано на рисунке 4.12.

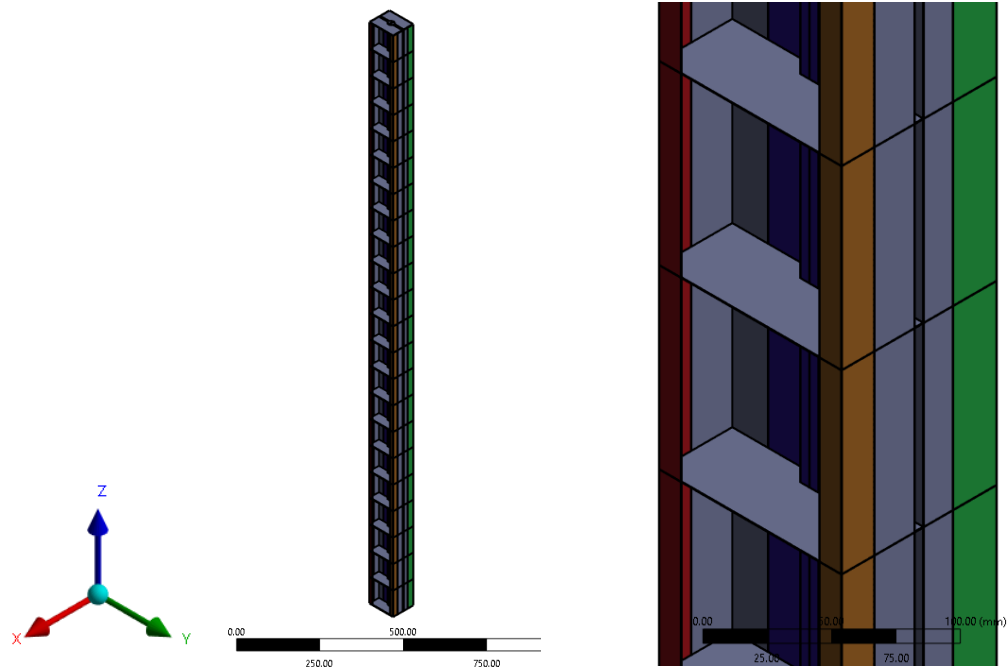


Рисунок 4.12 – Ребра жесткости Сигма-профиля

Такой способ соединения стержней не противоречит принятым допущениям, не меняет распределения секториальных площадей (координат) в сечении и не влияет на достоверность получаемых результатов.

Из анализа результатов расчета Сигма-профилей очевидно, что поведение стержня при расчете устойчивости по изгибной форме в плоскости меньшей жесткости не отличается от расчета устойчивости в плоскости большей жесткости, если погрешность от повторного учета деформаций контура поперечного сечения исключена. Результаты расчета устойчивости Сигма-профилей по изгибно-крутильной форме в целом аналогичны результатам расчета швеллеров и С-профилей.

§4.2. Физические эксперименты

§4.2.1 Цель и задачи экспериментов

Цель экспериментальных исследований – оценить достоверность результатов, получаемых с использованием «обратного» численно-аналитического метода «Стержень», а также результатов, получаемых численным моделированием стержней с использованием метода конечных элементов (МКЭ) по рекомендациям норм [115].

Задачи исследований:

- определение предельного усилия по критерию потери устойчивости стержней по изгибно-крутильной форме при сжатии с эксцентриситетом в плоскости большей жесткости;
- расчет стержней численно-аналитическим методом, представленным в главе 3;
- расчет стержней методом конечных элементов по рекомендациям [115];
- сопоставление и анализ полученных результатов.

§4.2.2 Объект исследования

Объектом исследования являются образцы спаренных профилей ЛСТК типа «Швеллер», «С-профиль», «Сигма-профиль». Схема загрузки показана на рисунке 4.1.

Предусмотрено 7 типоразмеров профилей, представленных в таблице 4.2. Расчетная длина образцов определена с учетом конструктивного оформления торцевых узлов и толщины ножевых шарниров. Основные геометрические характеристики поперечных сечений образцов представлены в таблицах 4.3 и 4.4. Рабочими чертежами на образцы предусмотрена марка стали «350» в соответствии с СП 260.1325800.2023. Сборочные схемы образцов показаны на рисунках 4.13–4.15.

Таблица 4.2 – Параметры типоразмеров профилей.

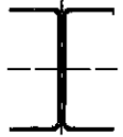
Профиль	Типоразмер	Длина профиля L_0 , мм	Эксцентриситеты		Расчетная длина L , мм	Гибкости		Кол-во образцов
			e_x , мм	e_y , мм		λ_x	λ_y	
	Ш-1100	1100	—	32	1220	29,0	74,0	3
	Ш-1400	1400	—	32	1520	36,1	92,1	3
	Ш-1900	1900	—	16	2020	48,0	122,4	3
	С-1400	1400	—	51	1520	23,8	41,9	3
	С-2100	2100	—	51	2170	33,9	59,8	3
	Сигма-1400	1400	—	80	1520	14,4	42,1	3
	Сигма-2100	2100	—	80	2170	20,5	60,0	3
Всего								21

Таблица 4.3 – Базовые геометрические характеристики

Профиль	b_1 , мм	h , мм	b , мм	t , мм	u , мм	A , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	I_p , см ⁴	I_k , см ⁴	J_ω , см ⁶
ВШ 110х40х1.5	40	110	85	1,5	370	5,55	98,4	15,1	113,5	0,0416	251
ВС160х70х1.5	70	160	145	1,5	662	9,93	405,9	130,7	536,6	0,0745	7170
ВПС280х80х1.5	80	280	165	1,5	970	14,55	1630,3	190,0	1 820,3	0,1091	24 975

Таблица 4.4 – Производные геометрические характеристики

Профиль	W_x , см ³	W_y , см ³	ρ_x , мм	ρ_y , мм	i_x , мм	i_y , мм
ВШ 110х40х1.5	17,64	3,50	32,2	6,4	42,1	16,5
ВС160х70х1.5	50,28	17,87	51,1	18,2	63,9	36,3
ВПС280х80х1.5	115,33	22,81	80,0	15,8	105,9	36,1

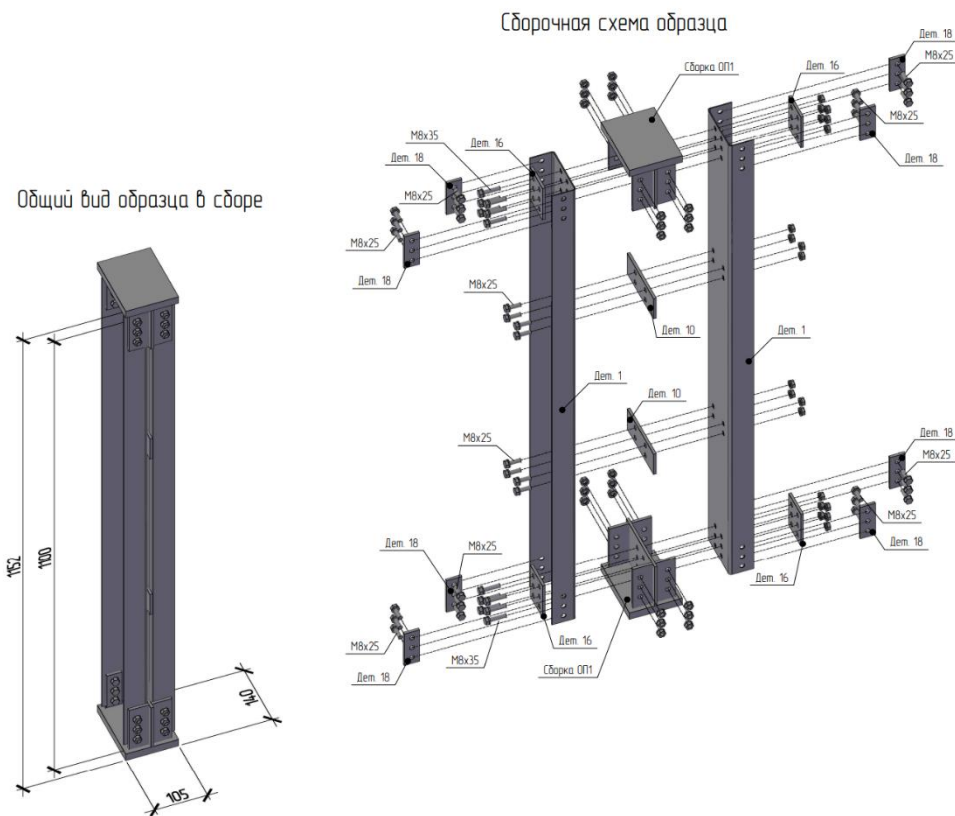


Рисунок 4.13 – Сборочная схема типоразмера «Ш-1100»

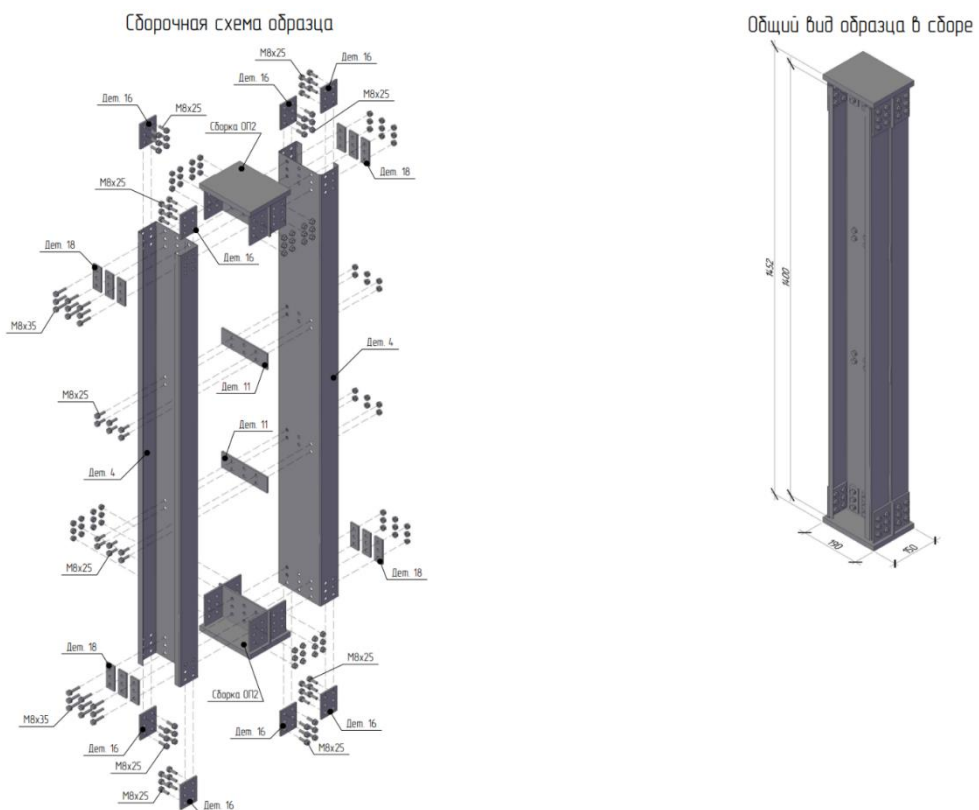


Рисунок 4.14 – Сборочная схема типоразмера «С-1400»

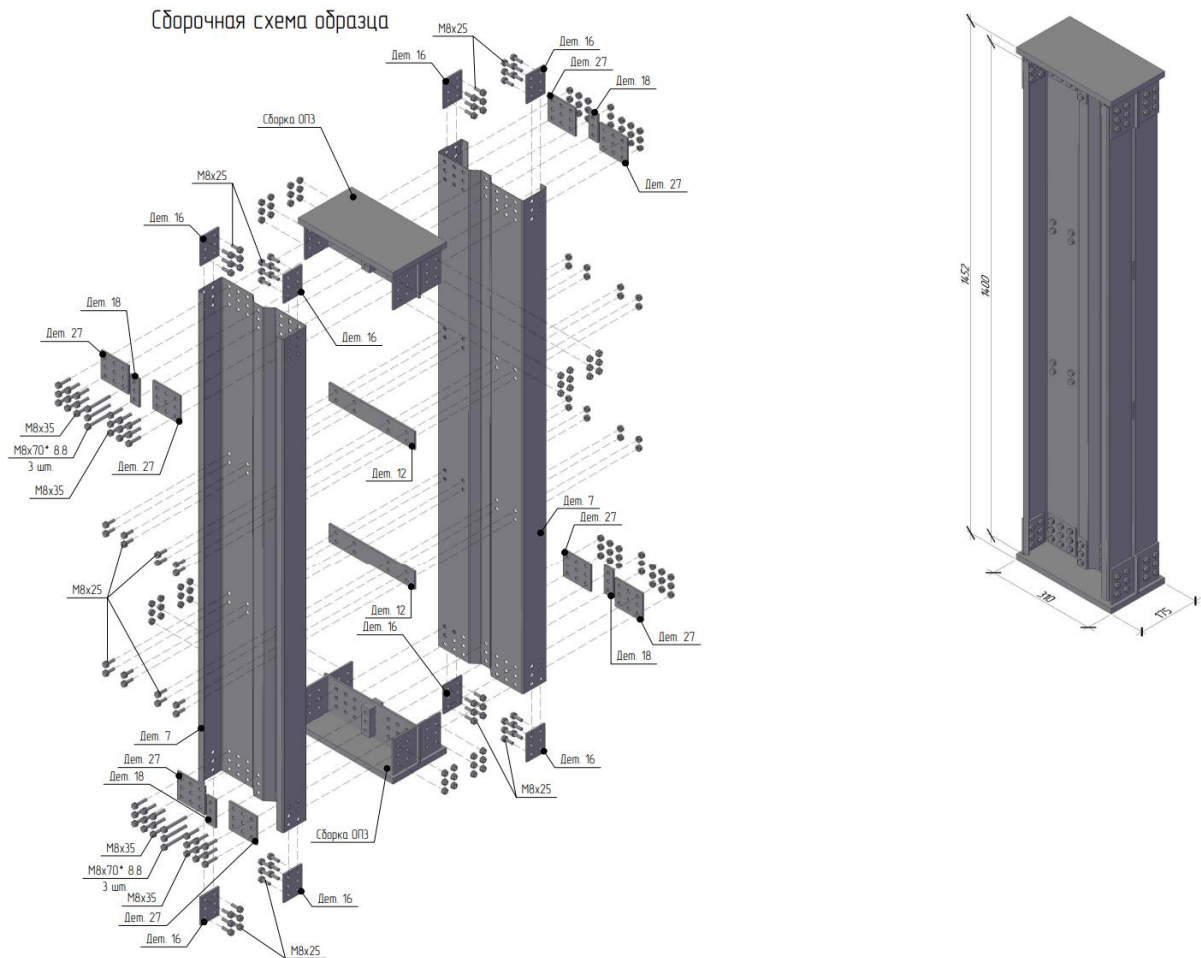
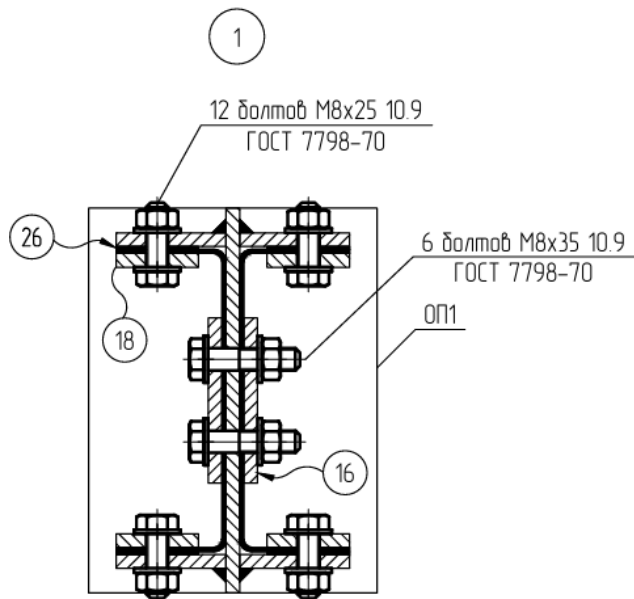


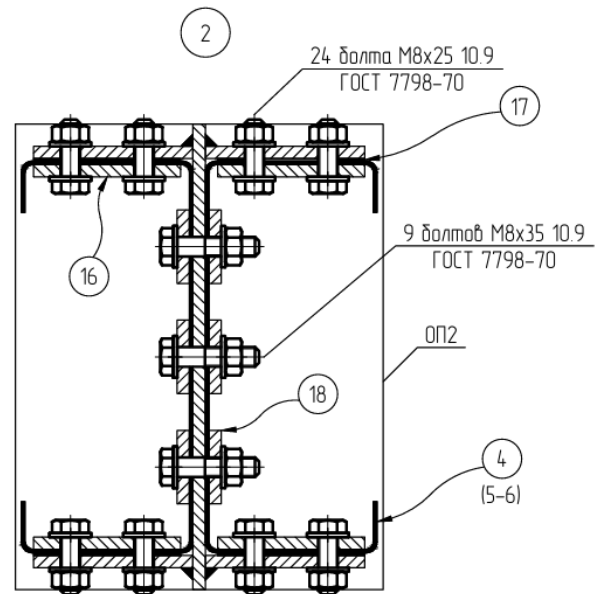
Рисунок 4.15 – Сборочная схема типоразмера «Сигма-1400»

Для равномерной передачи усилий с торцевого узла на профиль предусмотрены соединения на высокопрочных болтах. Профиль при этом зажимается между вертикальными ребрами, которые приварены к опорной плите, и распределительными пластинами толщиной 5 мм. Болтовые соединения рассчитаны на осевое усилие, близкое к несущей способности стержня на растяжение. Торцевые пластины приняты толщиной 16 мм. Для проведения испытаний Сигма-профилей в их опорном узле предусмотрена дополнительная «пятая» толщиной 25 мм, необходимая для размещения опорного узла внутри рамки ножевого шарнира (см. рисунок 4.17). На рисунке 4.16 показаны разрезы по опорным поперечным сечениям образцов.

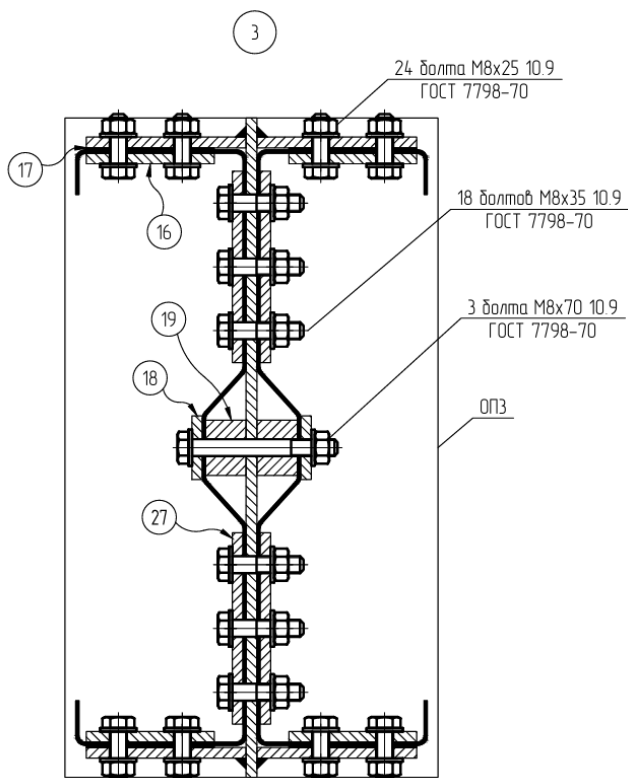
а)



б)



в)



г)



Рисунок 4.16 – Опорные узлы: а) образца «Ш-1100», б) образца «С-1400»,
в) образца «Сигма-1400», г) пята в опорном узле образцов из Сигма-профиля

§4.2.3 Проведение испытаний

Испытания проведены в секторе механических испытаний строительных конструкций ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Для передачи нагрузки на стержень с заданными эксцентриситетами использованы ножевые шарниры, схема которых показана на рисунке 4.17.

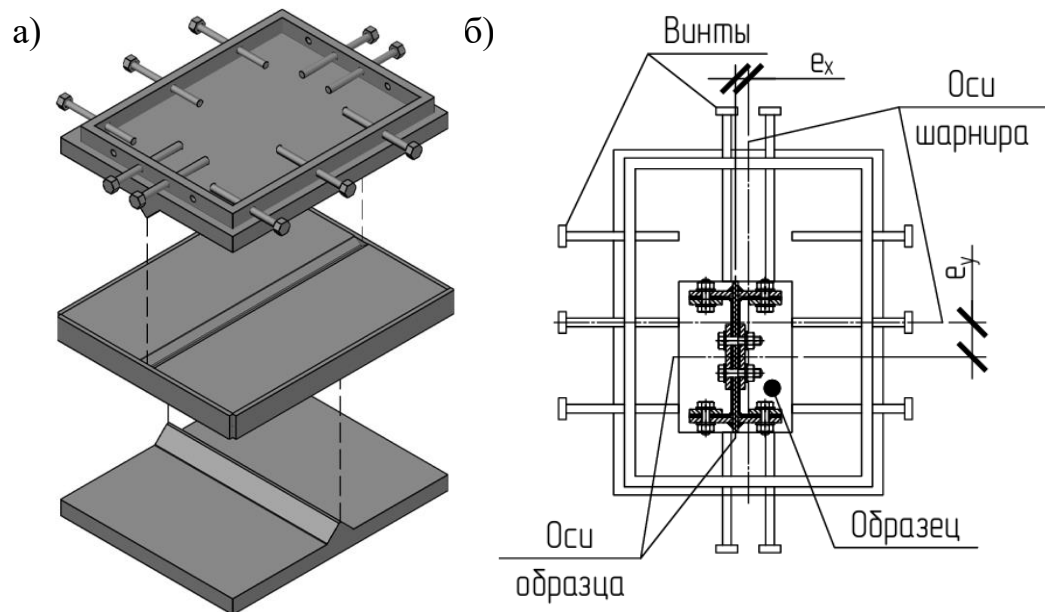


Рисунок 4.17 – Ножевые шарниры: а) общий вид, б) схема установки образца

Перемещения образцов измерены с использованием прогибомеров «ПАО-6» с ценой деления 0,01 мм в 9 точках стержня, как показано на рисунке 4.18а, что позволяет рассчитать прогибы u и v , направленные против осей x и y соответственно, а также угол поворота θ вокруг оси z для наиболее нагруженного сечения.

В среднем сечении каждого стержня установлены 8 тензодатчиков: по 2 тензодатчика в 4 точках сечения как показано на рисунке 4.18б. Двустороннее расположение датчиков обеспечивает измерение среднего по толщине напряжения, т.к. напряжения на поверхностях пластин различаются вследствие выгиба при потере местной устойчивости. Показания тензодатчиков регистрировались при помощи многоканального измерительного комплекса «TDS-530» производства компании «Tokio Sokki Kenkyujo Co.» (Япония).

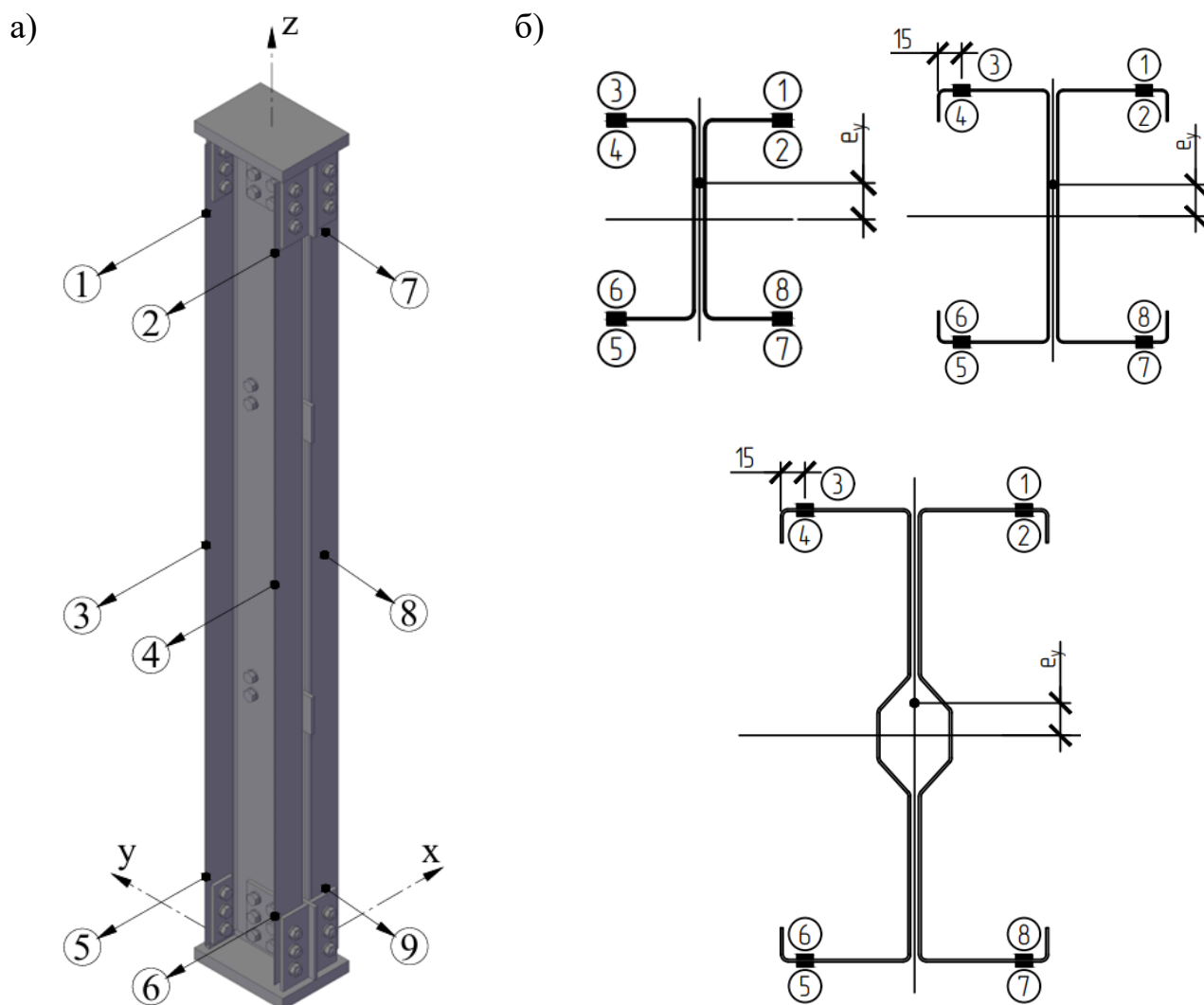


Рисунок 4.18 – Схемы расположения измерительного оборудования:

а) прогибомеры; б) тензодатчики в сечениях образцов

Испытания проведены с использованием испытательной универсальной машины «BISS UT-05-1000». Нагрузка приложена в силовой раме модели «АС-01-0210», рассчитанной на нагрузки до 1000 кН, при помощи гидравлического оборудования модели «АС-03-0065» производства компании «ITW India Pvt Ltd-BISS Division» (Индия). Запись диаграммы «перемещение-нагрузка» осуществлялась при помощи компьютерной программы, под управлением которой работает установка. Общий вид испытательной установки показан на рисунке 4.19.



Рисунок 4.19 – Общий вид испытательной установки с образцом «Ш-1100»

Для каждого образца определены:

- предельная сжимающая сила N_u ;
- показания тензорезисторов по каждому шагу нагружения;
- показания прогибомеров по каждому шагу нагружения;
- предел текучести по испытаниям образцов, отобранных из наименее нагруженных частей разрушенных элементов.

§4.2.4 Краткая характеристика полученных результатов

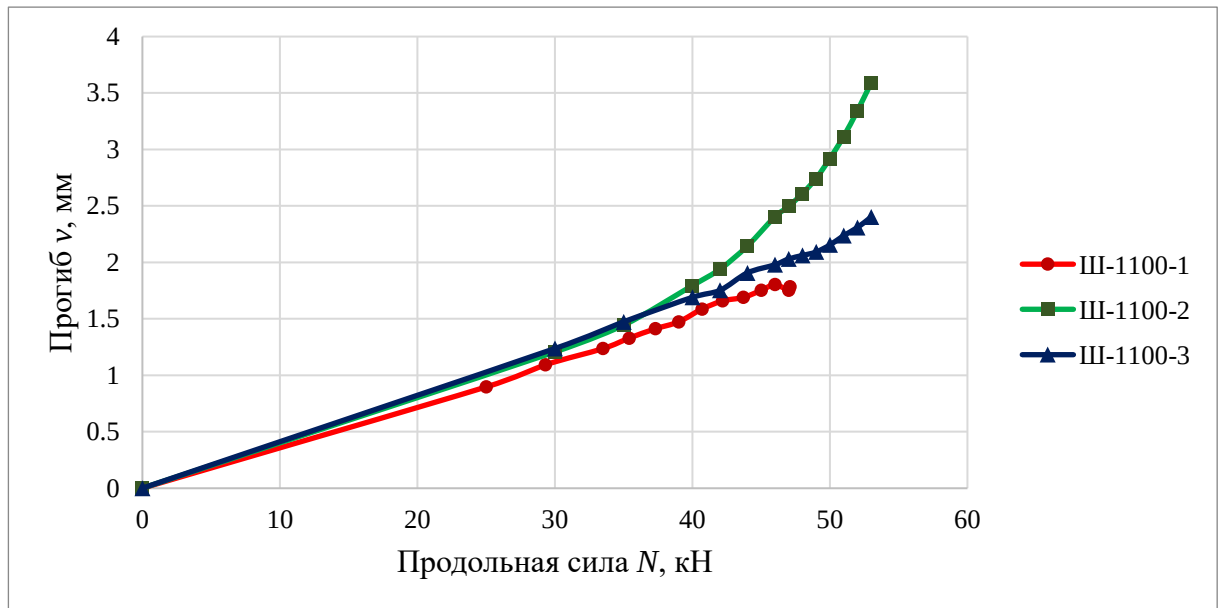
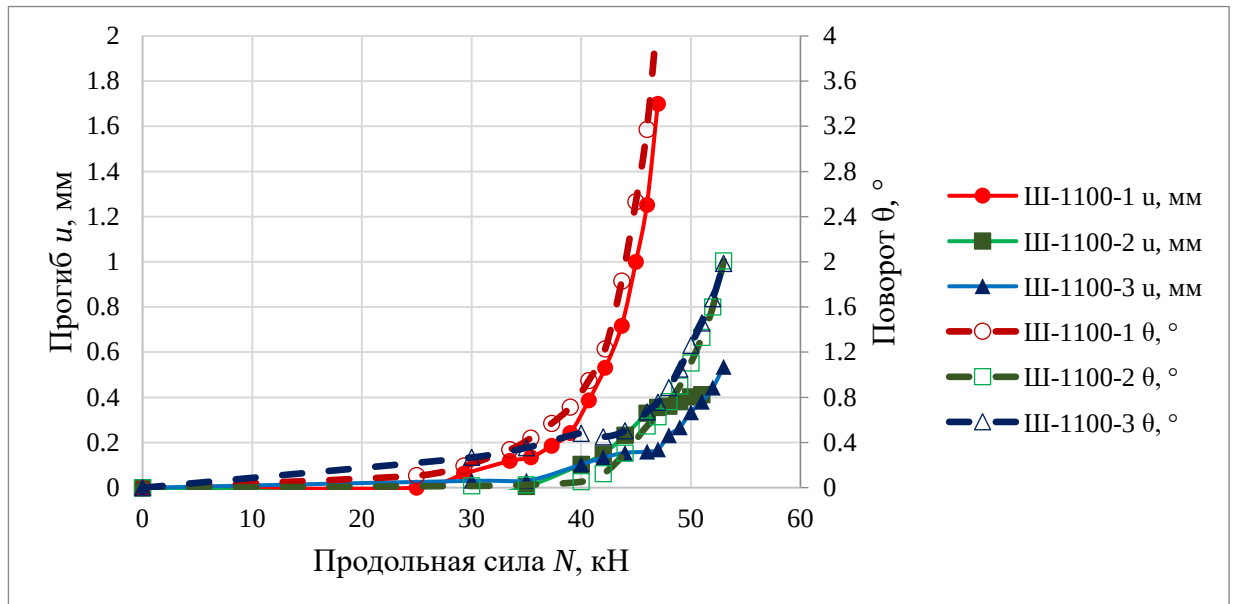
На начальном этапе нагружения во всех испытаниях зафиксирован линейный рост измеряемых параметров. Увеличение прогиба в плоскости большей жесткости согласуется с результатами расчета по недеформированной схеме с использованием момента инерции полного сечения. Разница деформаций по толщине листа незначительна.

При дальнейшем росте нагрузки прогибы в двух плоскостях увеличиваются нелинейно (см. рисунки 4.20 и 4.21), при чем прогиб в плоскости меньшей жесткости сопровождается поворотом среднего сечения и начинает возрастать нелинейно при меньшем значении нагрузки. На этом этапе также фиксируется перераспределение напряжений в сечении (см. рисунок 4.22) и увеличение разности деформаций по толщине пластин (см. рисунок 4.23), что свидетельствует о начале потери местной устойчивости, а выгиб наиболее нагруженной полки различим визуально для образцов из спаренного швеллера.

На последнем этапе нагружения характер работы образцов различался.

Напряжения в сечении спаренных швеллеров постепенно перераспределялись таким образом, чтобы воспринимать возрастающий изгибающий момент в плоскости меньшей жесткости, и перед разрушением в точке с тензодатчиками 7-8 фиксировался значительный рост сжимающих напряжений, а также значительный рост разности деформаций по толщине, в то время как в точке с тензодатчиками 3-4 происходила разгрузка. Разрушение образцов из спаренных швеллеров происходило за счет исчерпания несущей способности наиболее нагруженной ветви, при чем до разрушения выгиб как полка, так и стенки этой ветви были различимы визуально (см. рисунок 4.25).

В образцах из спаренных С- и Сигма-профилей вплоть до момента разрушения перераспределения напряжений в сечении не наблюдалось (см. рисунок 4.24), при этом и разность деформаций по толщине была незначительна. Разрушение происходило за счет исчерпания несущей способности в сжатых полках двух ветвей одновременно, при этом в сжатой части образцов практически мгновенно возникали складки (см. рисунок 4.25).

Рисунок 4.20 – Прогиб « v » образцов типоразмера «Ш-1100»Рисунок 4.21 – Перемещения « u » и « θ » образцов типоразмера «Ш-1100»

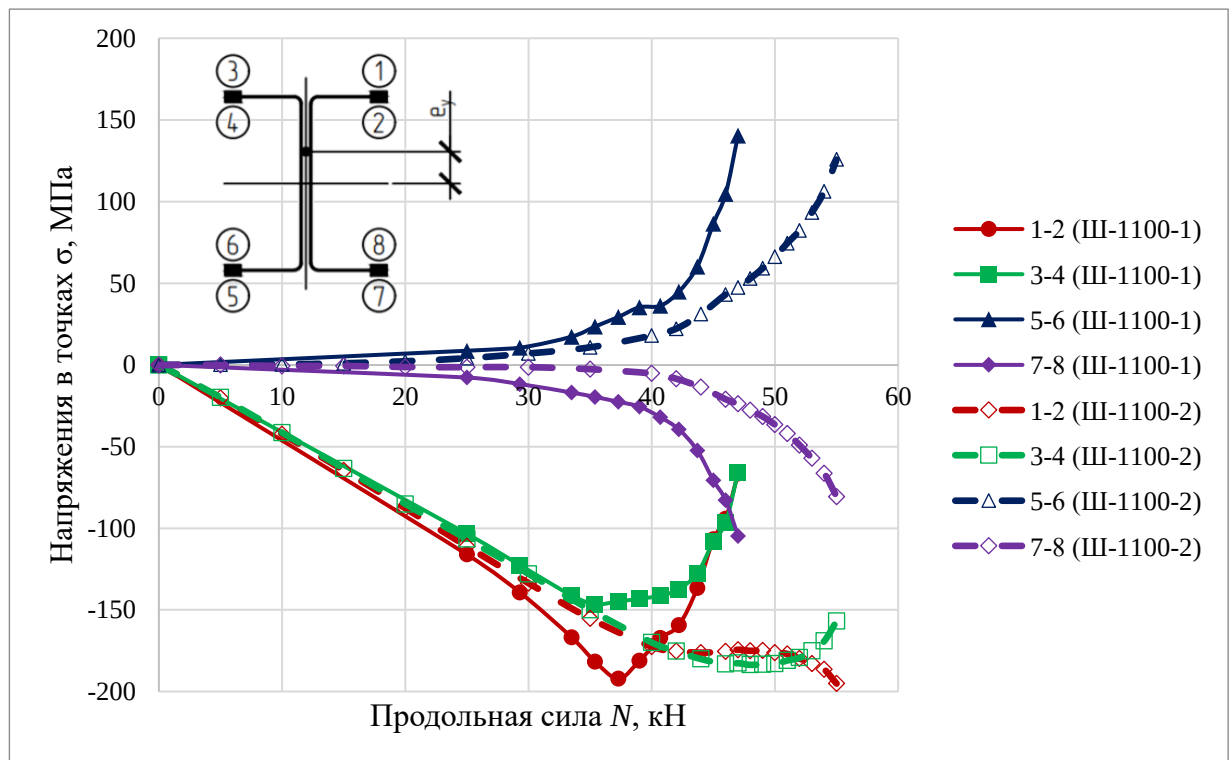


Рисунок 4.22 – Напряжения в точках образцов типоразмера «Ш-1100»

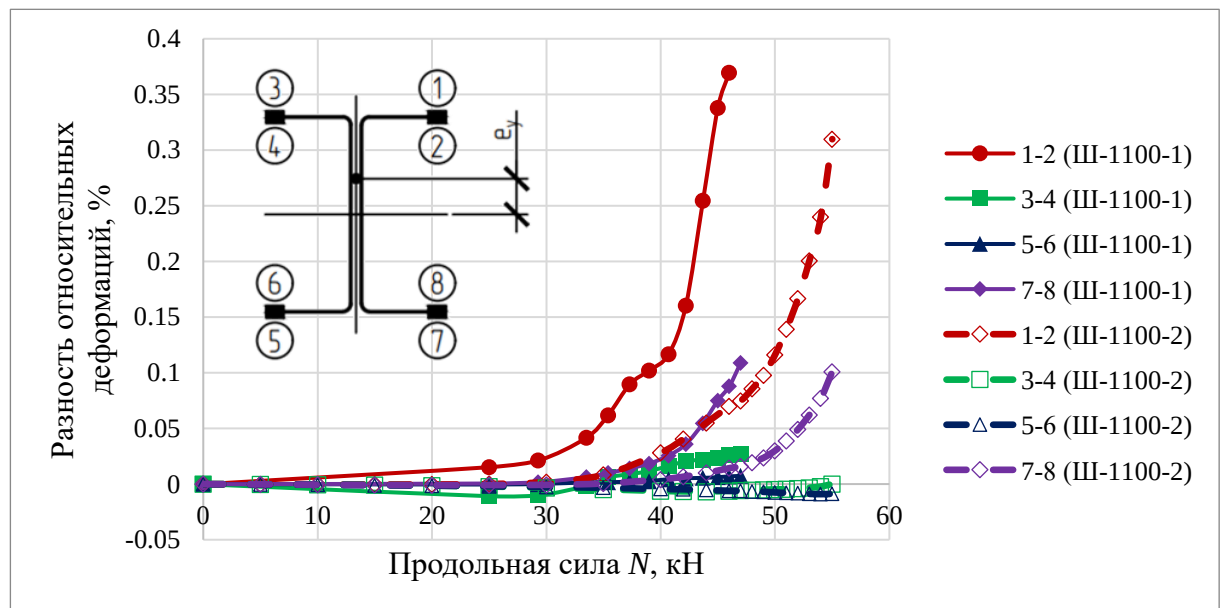


Рисунок 4.23 – Разность деформаций в точках образцов типоразмера «Ш-1100»

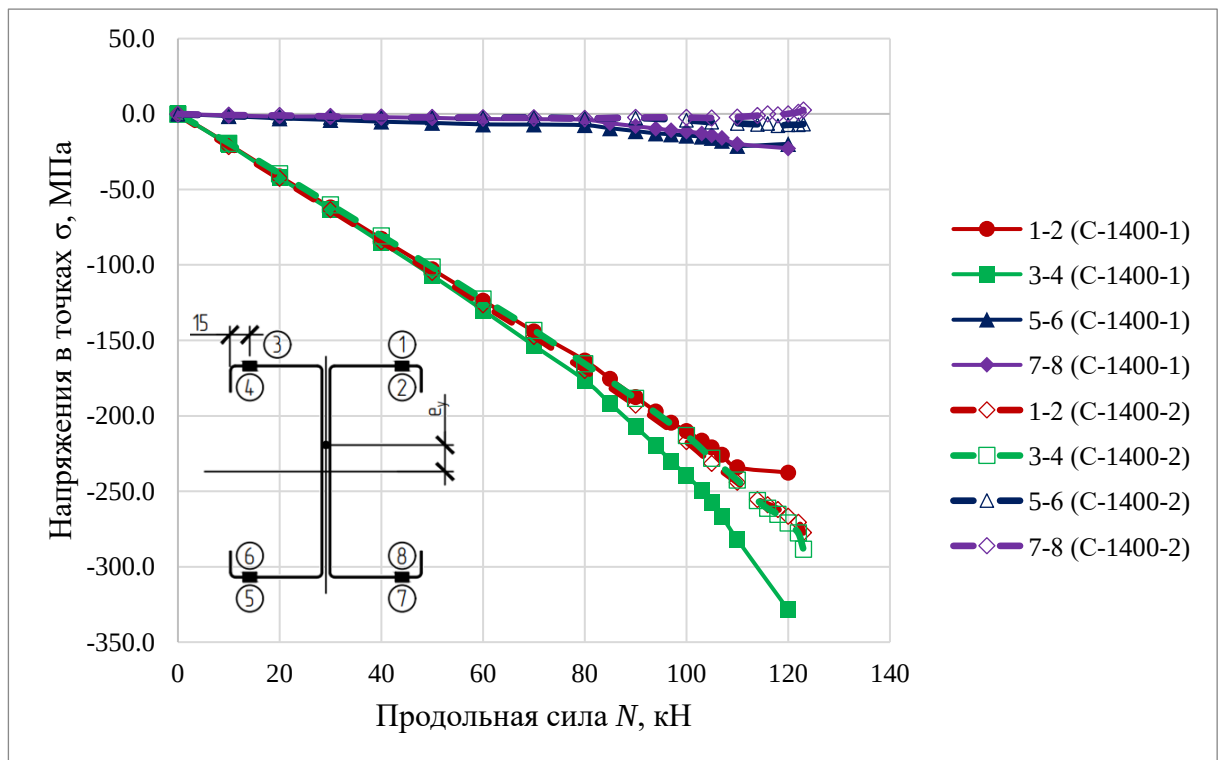


Рисунок 4.24 – Напряжения в точках образцов типоразмера «С-1400»

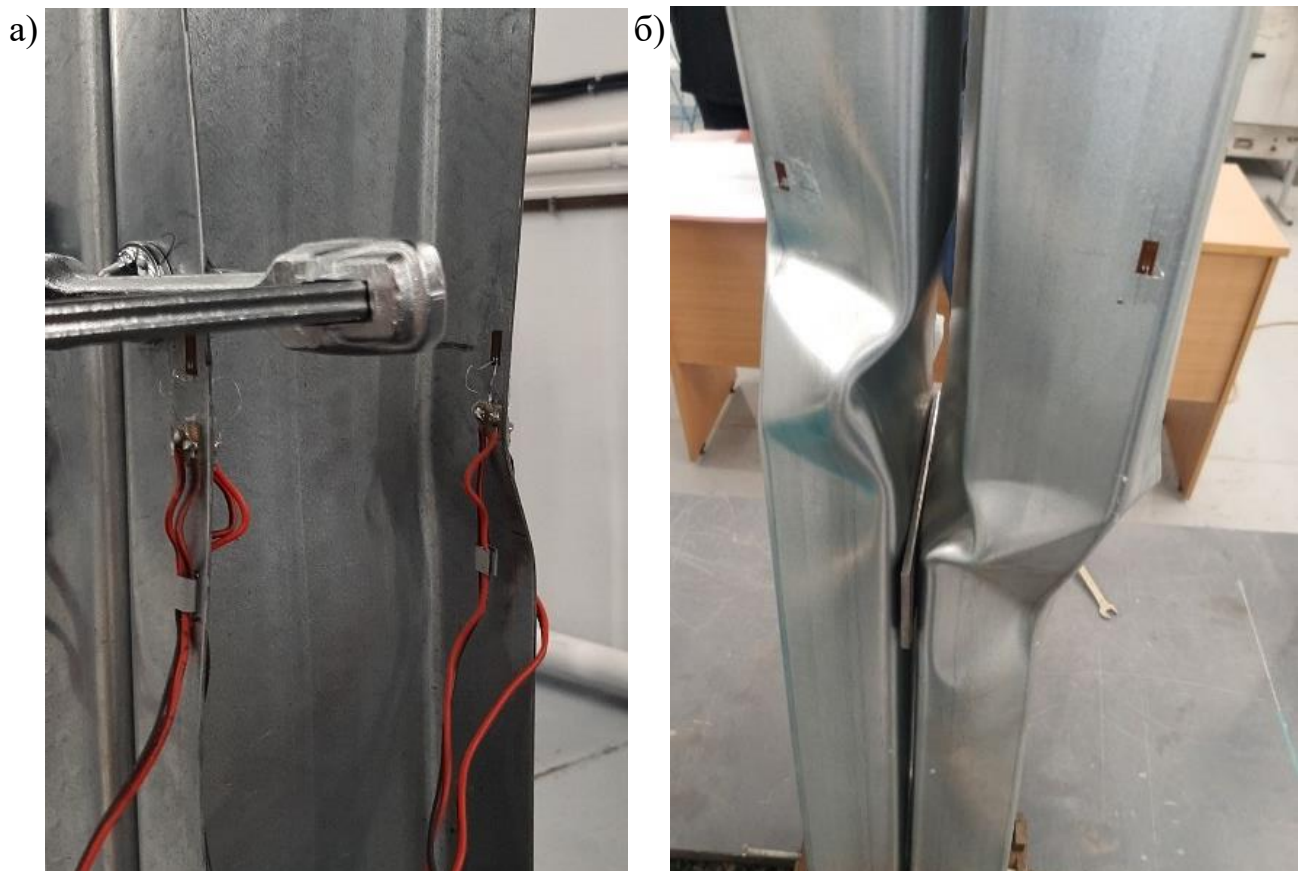


Рисунок 4.25 – Потеря местной устойчивости: а) швеллеров; б) С-профилей.

§4.2.5 Расчет методом конечных элементов

Европейскими нормами [115] допускается выполнять расчет элементов ЛСТК методом конечных элементов в физически- и геометрически-нелинейной постановке с учетом начальных несовершенств, форму которых рекомендуется принимать по первой собственной форме потери местной устойчивости, а амплитуду назначать равной 80% от соответствующего допуска по стандарту на профиль.

Для сопоставления результатов экспериментов с расчетами по требованиям [115] выполнен расчет стержней со следующими параметрами:

- поперечное сечение, расчетная длина, эксцентриситет приложения нагрузки в плоскости большей жесткости e_y приняты аналогично испытанным стержням;
- расчетное сопротивление стали принято по результатам испытаний на разрыв образцов, которые отобраны из наименее нагруженных зон разрушенных элементов;
- для учета начальных несовершенств в плоскости меньшей жесткости принято значение случайного эксцентриситета, соответствующее СП 16.13330.2017 по формуле $m_{сл} = -\alpha + \beta \bar{\lambda}_y$, где α, β – коэффициенты по таблице 7 указанных норм;
- допуск на изготовление принят в соответствии с ГОСТ Р 58384-2019, амплитуда начальных несовершенств для учета потери местной устойчивости принята равной 2 мм.

Схема загрузки показана на рисунке 4.1. Для моделирования образцов использованы плоские четырехугольные конечные элементы тонкой оболочки, построенные по срединным поверхностям пластин. Совместная работа ветвей обеспечена поперечными пластинками, которые расставлены с шагом $4h_w$ и заполняют зазор между стенками, соединяя их по всей высоте сечения, моделируя, таким образом, соединительные планки.

Для учета физической нелинейности принята билинейная модель материала с изотропным упрочнением. Касательный модуль деформации на площадке текучести принят в тысячу раз меньше модуля упругости.

В качестве граничных условий для расчёта принят запрет поступательных перемещений, а также поворота $d\varphi_z$ вокруг оси z точки с координатами $x = x_e$, $y = y_e$, $z = 0$ связанной с границами в плоскости $z = 0$. Аналогично, для точки с координатами $x = x_e$, $y = y_e$, $z = L$, связанной с границами в плоскости $z = L$, принят запрет перемещений вдоль осей x, y и поворота $d\varphi_z$.

Внешнее воздействие моделируется в виде силы вдоль оси $(-z)$ точки с координатами $x = x_e$, $y = y_e$, $z = L$, связанной с границей $z = L$. Величина нагрузки принята в полтора раза больше рассчитанной по численно-аналитическому методу. Общий вид расчетной схемы показан на рисунке 4.26.

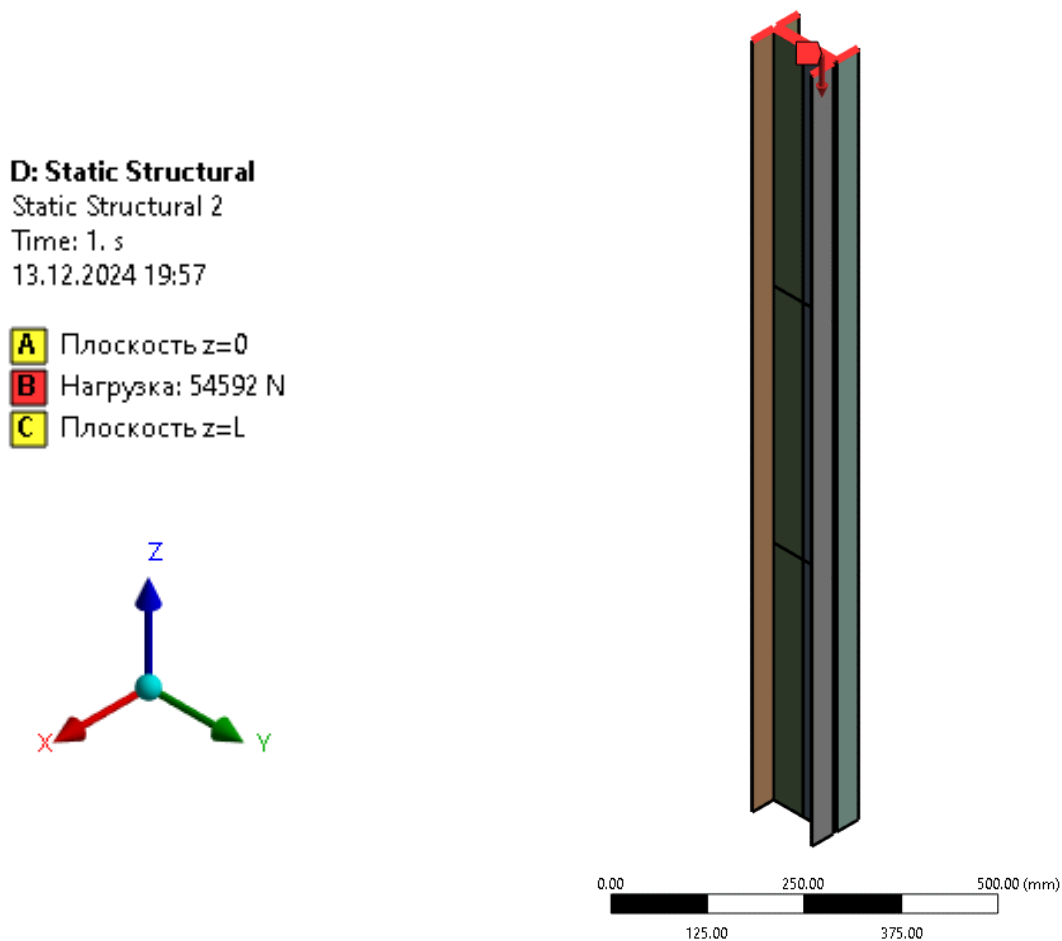


Рисунок 4.26 – Общий вид расчетной схемы

Форма начальных локальных несовершенств принята по первой форме потери устойчивости, рассчитанной при равномерном распределении сжимающих напряжений по контуру поперечного сечения (см. рисунок 4.27).

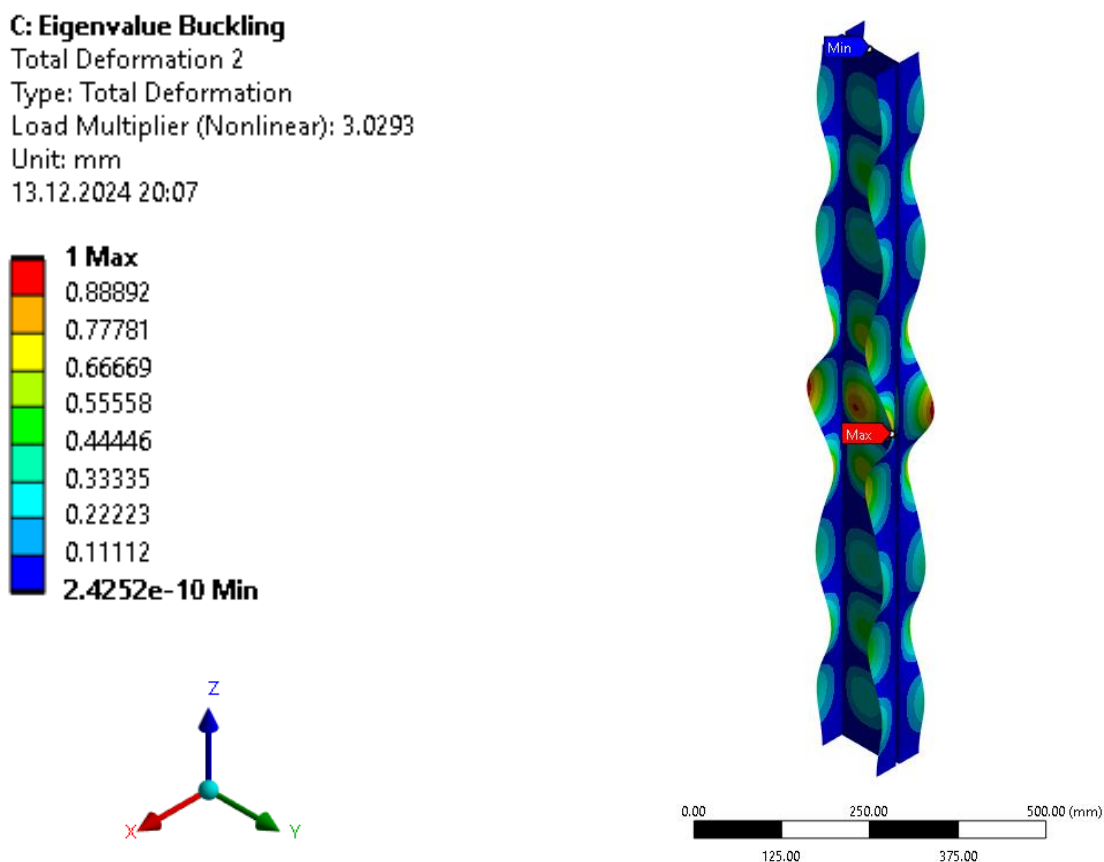


Рисунок 4.27 – Первая форма потери устойчивости образцов «Ш-1100»

Расчет выполнен по деформированной схеме с учетом больших перемещений. Решение задачи произведено по шагово-итерационному алгоритму с использованием метода Ньютона-Рафсона. В качестве предельного состояния принят последний шаг нагрузки, на котором удастся найти равновесное состояние (см. рисунок 4.28).

Анализ результатов расчетов показывает, что достижение предельного состояния связано с достижением предела текучести в срединной поверхности наиболее нагруженной полки, что согласуется с нормативным критерием прочности и устойчивости элементов ЛСТК.

a)

D: Static Structural

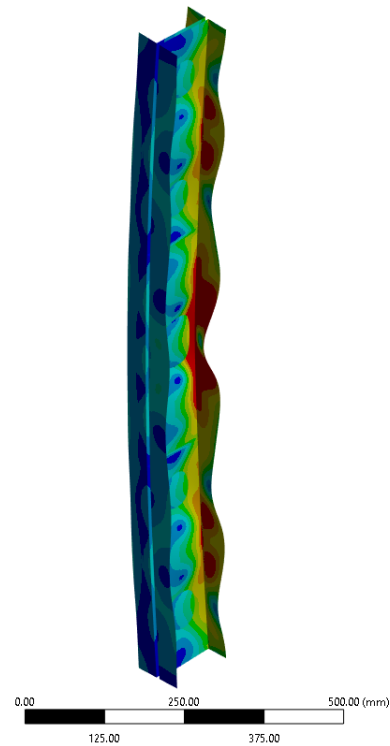
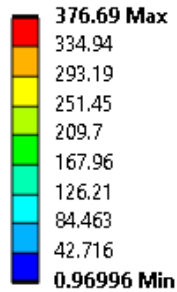
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1 s

13.12.2024 20:34



б)

D: Static Structural

Equivalent Plastic Strain 2

Type: Equivalent Plastic Strain - Top/Bottom

Unit: mm/mm

Time: 1 s

13.12.2024 20:36

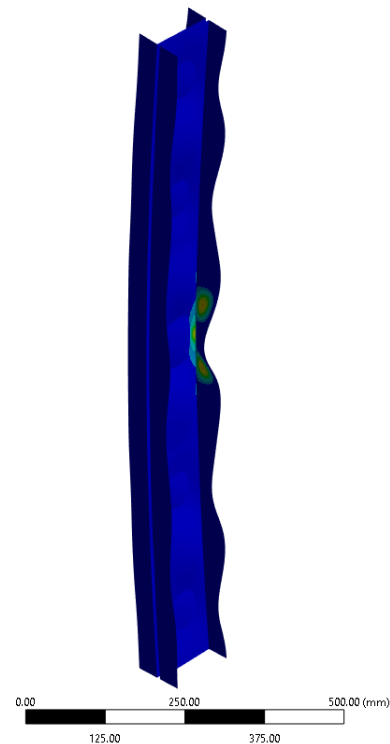
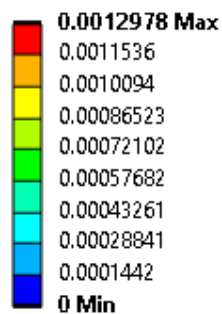


Рисунок 4.28 – Предельное состояние образца «Ш-1100»: а) распределение эквивалентных напряжений на внешних гранях оболочек; б) распределение эквивалентных пластических деформаций на внешних гранях оболочек.

§4.2.6 Сравнение результатов расчетов и испытаний

Сравним результаты проведенных испытаний с результатами расчетов методом конечных элементов и результатами расчетов разработанным численно-аналитическим методом.

На рисунках 4.29-4.32 показаны совмещенные графики прогибов в двух плоскостях и углов поворота среднего сечения.

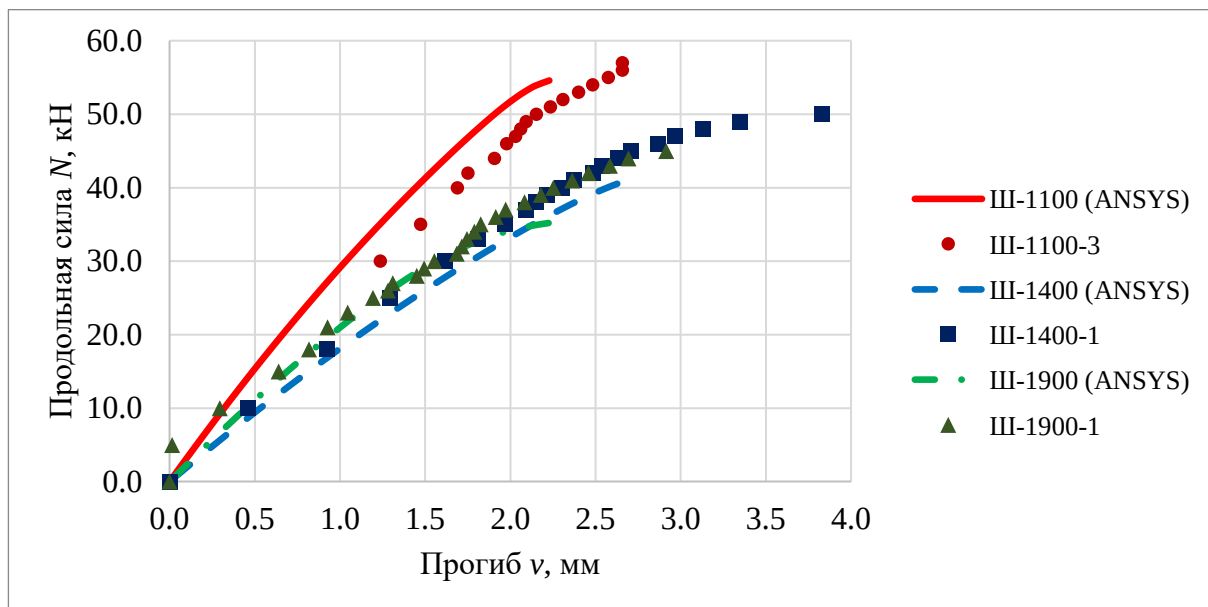


Рисунок 4.29 – Прогибы « v » для спаренных швеллеров

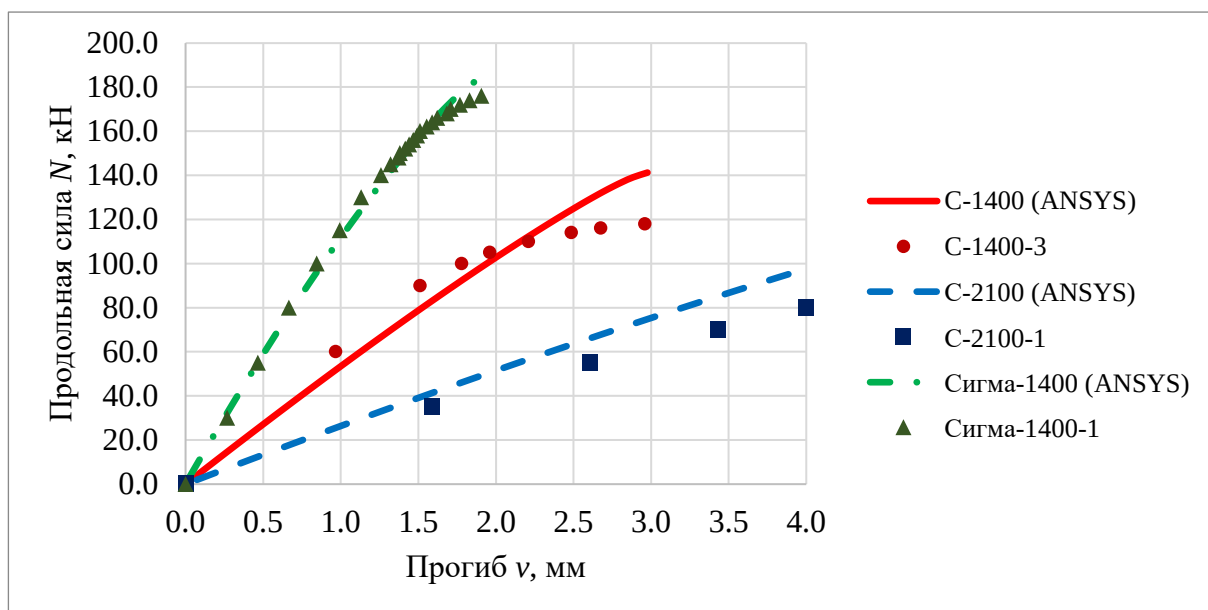
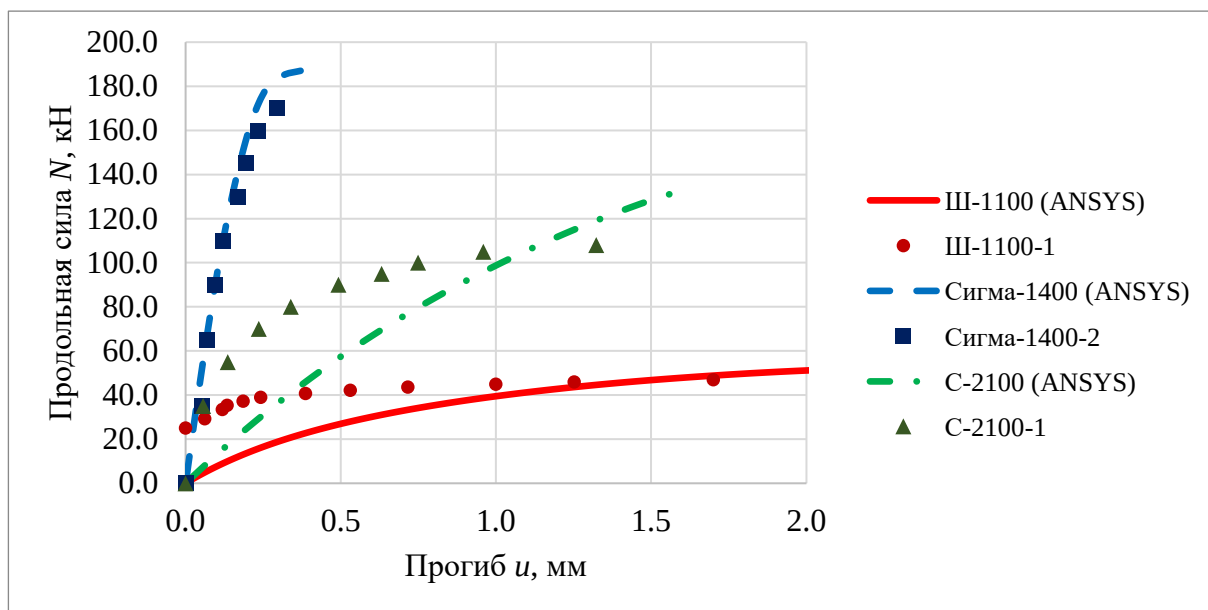
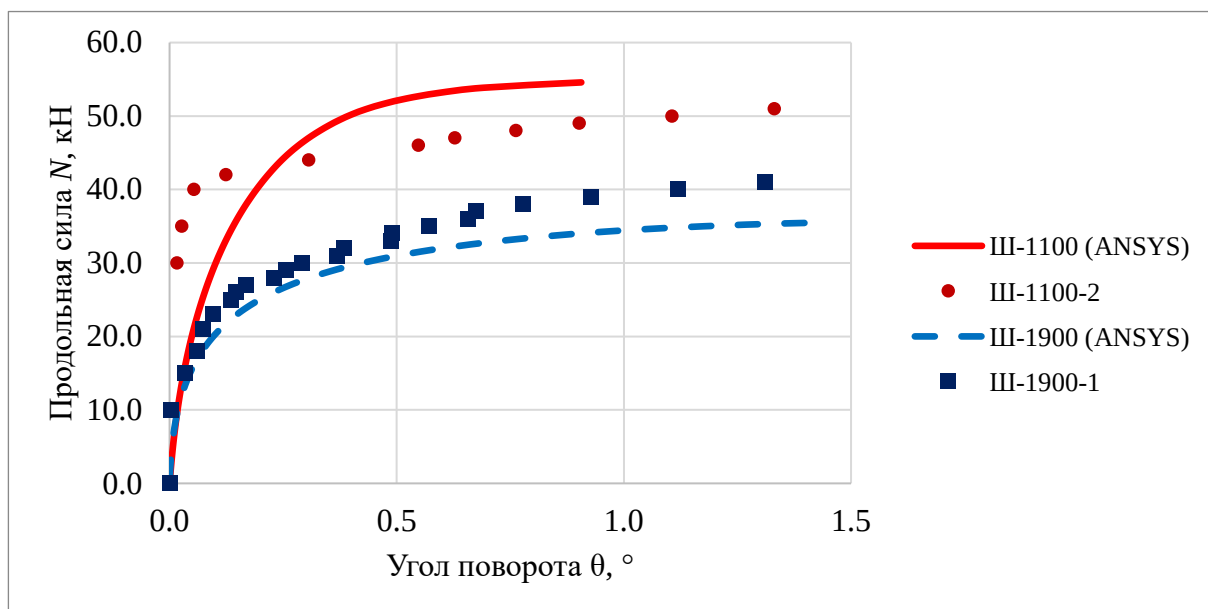


Рисунок 4.30 – Прогибы « v » для С- и Сигма-профилей

Рисунок 4.31 – Прогибы « u » в плоскости меньшей жесткостиРисунок 4.32 – Углы поворота « θ » среднего сечения

Как видно по графикам, прогибы « v » в плоскости эксцентриситета хорошо согласуются с расчетом в ANSYS для всех испытанных образцов. Прогибы « u » и углы поворота « θ », полученные экспериментально, численно отличаются от рассчитанных в ANSYS, но характер их изменения при увеличении нагрузки согласуется с расчетами: перед достижением предельного состояния углы поворота и прогибы в плоскости меньшей жесткости многократно возрастают.

Стоит отметить, что прогибы « u » и углы поворота « θ », измеренные при испытаниях различных экземпляров одного типоразмера, также значительно различаются по величине (см. рисунок 4.21), что определяется случайным характером начальных несовершенств стержня: погибью в плоскости меньшей жесткости, скручиванием, локальными несовершенствами. При расчете в ANSYS начальные несовершенства, учитывающие погибь в плоскости меньшей жесткости, заданы опорными эксцентриситетами, начальное скручивание стержня не учитывалось, а начальные локальные несовершенства заданы по симметричной форме потери устойчивости.

На начальном этапе нагружения влияние малого прогиба « u » на прочность в наиболее нагруженном сечении мало. При увеличении продольной силы и сближении её с критическим значением по изгибно-крутильной форме потери устойчивости прогиб « u » многократно возрастает, при этом малому приращению продольной силы соответствует большое приращение деформационного коэффициента $K_{d,y}$, поэтому влияние величины начальной погиби снижается.

В таблице 4.5 приведены средние значения предельной продольной силы испытанных образцов, а также результаты расчетов методом СП 260.1325800 (см. «СП 260»), представленным в пятой главе работы практическим методом (см. «Практ.»), представленным в третьей главе работы численно-аналитическим методом (см. «Числ. анализ.»), а также МКЭ по §4.2.5 (см. «МКЭ»).

Таблица 4.5 – Результаты испытаний и расчетов различными методами

Испытания						Расчетная предельная продольная сила, кН			
Типоразмер	$N_u(\text{ср})$, кН	R_y , МПа	ϕ	$\bar{\lambda}_y$	m_x	СП 260	Практ.	Числ. анализ.	МКЭ
С-1400	121.6	418	0.29	1.9	1.0	78.5	97.2	105.4	141.3
С-2100	109.2	418	0.26	2.7	1.0	70.2	91.8	98.4	132.8
Сигма-1400	170.8	426	0.28	2.0	1.0	105.3	125.3	138.5	187.1
Сигма-2100	147.1	426	0.24	2.7	1.0	95.6	118.7	133.7	180.0
Ш-1100	53.5	370.5	0.26	3.1	1.0	33.0	34.5	39.3	54.6
Ш-1400	50.4	370.5	0.24	3.9	1.0	28.1	29.8	32.7	41.4
Ш-1900	45.5	392	0.21	5.2	0.5	27.0	23.0	25.9	35.5

Расчеты в целом согласуются с результатами испытаний. Расчеты МКЭ в некоторых случаях дают завышенную оценку устойчивости, прочие расчеты дают консервативную оценку, при этом результаты расчета численно-аналитическим методом практически для всех образцов позволяют учитывать значительные резервы. Стоит отметить также, что запас устойчивости увеличивается с ростом гибкости стержня, что было отмечено в §4.1.4.

§4.3. Выводы по главе

1. Результаты расчетов деформационных коэффициентов разработанным обратным численно-аналитическим методом хорошо согласуются с результатами расчетов методом конечных элементов (МКЭ), при этом отклонения по величине усилий в наиболее нагруженном поперечном сечении не превышают 1% для стержней малой и средней гибкости.
2. Наибольшие отклонения численно-аналитического решения от результатов, полученных по МКЭ, выявлены при расчете устойчивости по изгибно-крутильной форме стержней большой гибкости, сжатых с большим эксцентриситетом. Эти результаты мало значимы с практической точки зрения ввиду крайне низких значений коэффициента устойчивости, при этом численно-аналитический метод дает консервативную оценку по сравнению с МКЭ.
3. Результаты расчетов разработанным методом и МКЭ по рекомендациям норм [114] в целом согласуются с результатами проведенных испытаний. При этом устойчивость испытанных образцов оказалась как выше, так и ниже оценки, полученной МКЭ, но не ниже оценки, полученной разработанным численно-аналитическим методом.
4. Результаты испытаний подтверждают наличие запасов устойчивости по изгибно-крутильной форме, которые выявлены при сравнении разработанного численно-аналитического метода расчета с нормативным методом и представлены в главе 5 настоящей работы.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК

§5.1. Предварительные замечания

С использованием разработанных и представленных в главах 2 и 3 численного метода расчета прочности и численно-аналитического метода расчета устойчивости можно мгновенно получить результаты проверки одного элемента на заданное нагружение, за несколько секунд – сотни единичных результатов, меньше, чем за одну минуту – тысячи и десятки тысяч результатов. Это позволило исследовать особенности работы элементов ЛСТК с различными поперечными сечениями для любых возможных на практике соотношений размеров сечения, гибкостей стержня, относительных эксцентриситетов. Высокая производительность позволяет использовать разработанные методы, например, для проверки элементов на прочность и устойчивость после расчета по определению внутренних усилий в программах, использующих метод конечных элементов.

В то же время проверка прочности и устойчивости элементов «обычных» конструкций (не ЛСТК) выполняется в одну итерацию с использованием геометрических характеристик сечений, которые сведены в сортаменты, а потому с точки зрения ручного расчета не требуют от инженера рассчитывать какие бы то ни было параметры поперечного сечения, а с точки зрения программ для автоматизации расчетов не требуют держать в памяти компьютера модель поперечного сечения – достаточно хранить только сам сортамент. Таким образом, использование ЛСТК в любом проекте так или иначе затрудняет расчет по сравнению с обычными стальными конструкциями, что ограничивает широкое применение ЛСТК.

Исходя из вышесказанного, разрабатываемые практические методы расчета прочности и устойчивости стержневых элементов ЛСТК должны отвечать следующим требованиям:

- удобство для ручного расчета;
- гармонизация с отечественным сводом правил [1];
- отсутствие итерационных алгоритмов;

- возможность расчета необходимых геометрических характеристик на этапе разработки сортамента.

Для соответствия этим требованиям усовершенствуем нормативный метод расчета прочности, а также представим новый метод расчета устойчивости, основанный на решении систем уравнений (3.55) и (3.58).

§5.2. Расчет прочности

§5.2.1 Проверка прочности при раздельном действии усилий

Обозначения главных центральных осей и положительные направления действующих усилий показаны на рисунке 5.1, при этом обозначения осей $x - x$ и $y - y$ принимается таким образом, что $I_x \geq I_y$.

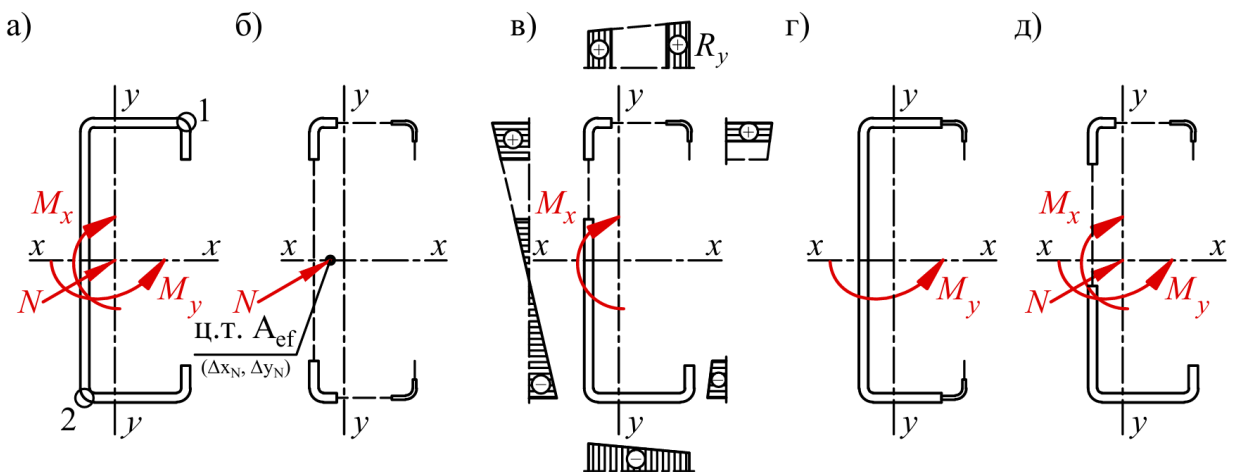


Рисунок 5.1 – Схемы к расчету С-профиля: а) обозначение главных центральных осей, усилий и характерных точек; б-г) редукция при однопараметрических загрузениях; д) редукция при общем загрузении.

Расчет на прочность при действии продольной силы или изгибающего момента в одной из главных плоскостей предлагается выполнять по формуле

$$\frac{F}{rG_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.1)$$

где F – расчетное значение усилия;

$r = \frac{G_{ef}}{G_g}$ – коэффициент редукции сечения;

G_{ef} – соответствующая усилию геометрическая характеристика редуцированного поперечного сечения;

G_g – то же, для полного сечения,

R_y – расчетное сопротивление стали;

γ_c – коэффициент условий работы.

Формула (5.1) аналогична формуле (7.6) свода правил [2]. Редукция сечения учитывается коэффициентом $r \leq 1$. Общий вид формулы (5.1) соответствует формуле (50) свода правил [1], но при расчете элементов с учетом упругопластической стадии работы по [1] используются коэффициенты $c_{x(y)} \geq 1$, отражающие увеличение предельного значения усилия по сравнению с упругой работой, а при расчете элементов ЛСТК используются коэффициенты $r \leq 1$, отражающие уменьшение предельного значения усилия по сравнению с расчетом по нередуцированному сечению.

Геометрические характеристики редуцированного поперечного сечения при расчете прочности и устойчивости в соответствии с разработанными методами используются только для расчета коэффициентов редукции r и дополнительных эксцентриситетов $\Delta x_N, \Delta y_N, \Delta x_H$. Т.к. значения коэффициентов редукции зависят от формы поперечного сечения, гибкостей составляющих его пластин, а также от отношения расчетного сопротивления к модулю упругости, как было показано в главе 2, они могут быть предварительно рассчитаны и приведены в сортаментах на профили для каждой из предусмотренных сводом правил [2] марок стали. Такой подход, во-первых, избавляет инженера от необходимости рассчитывать редукцию сечения (исключая наиболее трудоемкую задачу, в которой чаще всего возникают ошибки), во-вторых, удобен с точки зрения анализа.

Расчет на прочность при центральном растяжении или сжатии силой N предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{r_z A_{g,n} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.2)$$

где r_z – коэффициент редукции сечения при действии N , принимаемый $r_z = 1$

при растяжении и $r_z = \frac{A_{ef}}{A_g}$ при сжатии;

$A_{g,n}$ – площадь нередуцированного поперечного сечения нетто (с учетом ослабления отверстиями и/или вырезами);

A_g – то же, брутто;

A_{ef} – площадь эффективного поперечного сечения.

Формула (5.2) аналогична формулам (8.1) и (8.2) свода правил [2]. Редукция сечения учитывается коэффициентом $r_z \leq 1$. При расчете площади эффективного поперечного сечения A_{ef} сжимающие нормальные напряжения в сечении распределены равномерно и равны расчетному сопротивлению. В несимметричных сечениях при этом предельная продольная $N_u = A_{ef} R_y$ приложена в центре тяжести редуцированного сечения с координатами в осях полного сечения $(\Delta x_N, \Delta y_N)$ как показано на рисунке 5.16. Смещение центра тяжести редуцированного сечения учитываем аналогично действующим нормам дополнительными изгибающими моментами $\Delta M_{x,N} = -N \cdot \Delta y_N$ и $\Delta M_{y,N} = -N \cdot \Delta x_N$, с учетом которых прочность несимметричных сечений при действии сжимающей продольной силы следует всегда проверять по формуле (5.6).

Расчет на прочность при действии момента в одной из главных плоскостей предлагается выполнять по формуле

$$\frac{M_{x(y)}}{r_{x(y)} W_{g,n,x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.3)$$

где $r_{x(y)} = \frac{W_{ef,x(y)}}{W_{g,x(y)}}$ – коэффициент редукции сечения при действии $M_{x(y)}$;

$W_{g,n,x(y)}$ – момент сопротивления нередуцированного поперечного сечения нетто (с учетом ослабления отверстиями и/или вырезами);

$W_{g,x(y)}$ – то же, брутто;

$W_{ef,x(y)}$ – момент сопротивления редуцированного поперечного сечения.

Формула (5.3) аналогична формулам (8.24) и (8.25) свода правил [2]. Редукция сечения учитывается коэффициентом $r_{x(y)} \leq 1$. Как и в формулах (41) и (50) свода правил [1], здесь учитывается дополнительно ослабление отверстиями и/или вырезами через момент сопротивления $W_{g,n,x(y)}$. Для несимметричных сечений $W_{g,n,x(y)}$ – минимальное значение момента сопротивления, а коэффициенты редукции $r_{x(y)}$ определяются для каждой опасной точки (см. рисунок 5.1а).

Для расчета коэффициентов редукции можно использовать как численно-аналитические методы, так и численные методы, при этом r_x определяется при действии только M_x , а r_y – при действии только M_y (как показано на рисунках 5.1в и 5.1г), при этом распределение напряжений следует определять с учетом смещения центра тяжести и угла наклона главных центральных осей редуцированного поперечного сечения, как показано на рисунке 5.1в.

§5.2.2 Проверка прочности при сжатии с изгибом в одной плоскости

Расчет на прочность при действии момента в одной из главных плоскостей совместно с продольной силой предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{r_z A_{g,n} R_y \gamma_c} + \frac{M_{x(y)} + \Delta M_{x(y)}}{r_{x(y)} W_{g,n,x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.4)$$

где $\Delta M_x = -N \cdot \Delta y$, $\Delta M_y = -N \cdot \Delta x_N$ – дополнительные изгибающие моменты;

$\Delta x = \Delta x_N + \Delta x_H$, $\Delta y = \Delta y_N$ – смещение центра тяжести редуцированного поперечного сечения;

Δx_H – дополнительный эксцентриситет для спаренных в двутавр U-, C- и Σ -профилей.

Формула (5.4) аналогична формуле (8.33) свода правил [2], в случае, если один из изгибающих моментов M_x или M_y равен нулю. На рисунке 5.2 показаны изолинии поверхности прочности спаренных в двутавр С-профилей, изготовленных из стали с расчетным сопротивлением $R_y = 330$ МПа, с одинаковой формой ($\alpha_f = \frac{b_f}{h_w} = 0,5$, $\alpha_c = \frac{h_c}{b_f} = 0,2$, размеры обозначены на рисунке), с различными значениями гибкости стенки $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$. Как видно по рисунку 5.2а прочность при действии N и M_x достаточно точно аппроксимируется нормативной формулой.

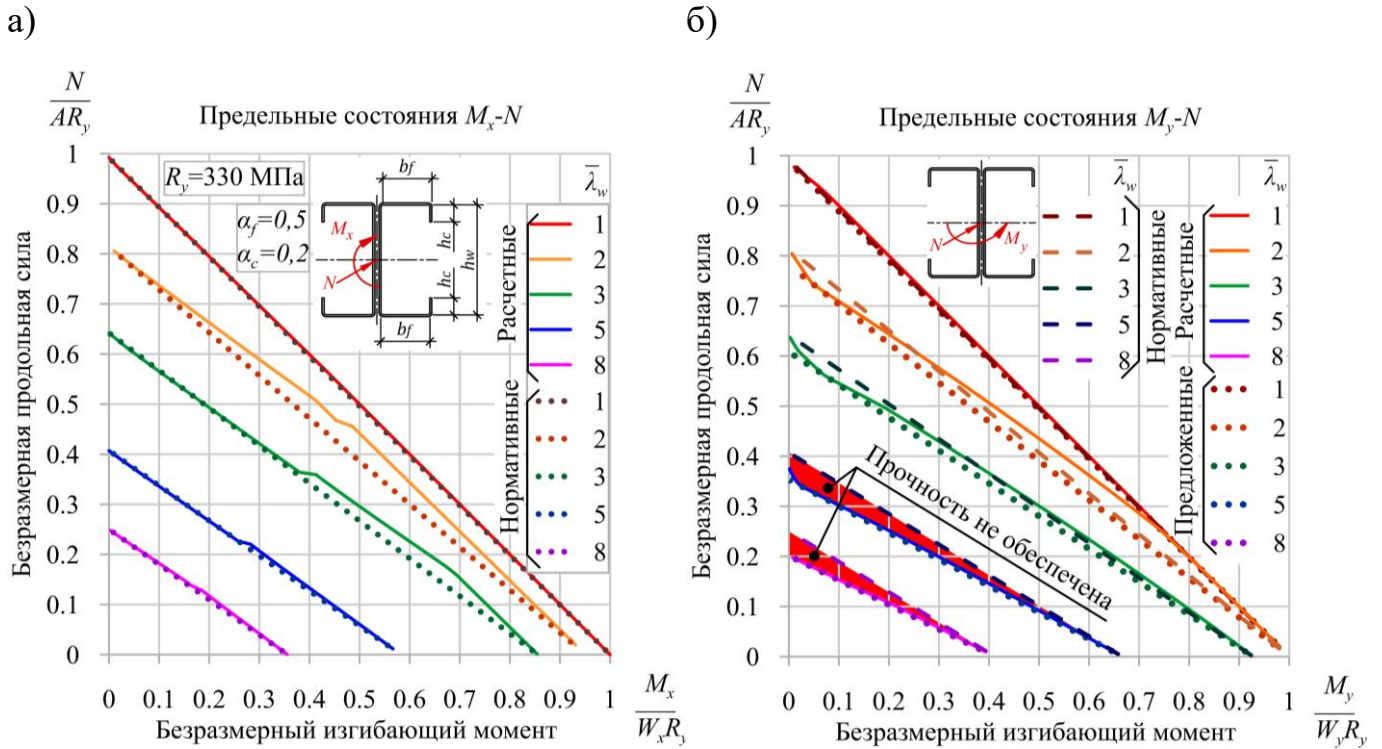


Рисунок 5.2 – Изолинии поверхности прочности спаренных в двутавр С-профилей: а) $M_y = 0$ при действии N и M_x ; б) $M_x = 0$ при действии N и M_y .

При совместном действии N и M_y , в формуле (5.4) для спаренных в двутавр U-, C- и Σ -профилей используется дополнительный эксцентриситет Δx_H , который необходим для учета значительного смещения центра тяжести редуцированного сечения при совместном действии продольной силы, близкой к $N_u = r_z A_g R_y$, и малого изгибающего момента $M_y \approx (0,05 \dots 0,1) r_y W_{g,y} R_y$.

Изолинии поверхности прочности на рисунке 5.2б получены по фактическому распределению напряжений, при этом на том же рисунке показаны аппроксимации изолиний по нормативной формуле (8.33) [2] и по предложенной формуле (5.4). Красным цветом выделены области значений N и M_y , в которых прочность не обеспечена использованием нормативной формулы.

Смещение центра тяжести редуцированного сечения при малых значениях изгибающего момента сильнее сказывается на снижение предельной продольной силы в спаренных U-профилях (например, при $\bar{\lambda}_w = 3$ и $\alpha_f = 0,25$ снижение продольной силы достигает 23,4% от величины $r_z A_{g,n} R_y$).

Значение дополнительного эксцентриситета Δx_H получим из условия прочности (5.4) при действии изгибающего момента в плоскости меньшей жесткости (при этом за счет симметрии относительно оси «у» имеем $\Delta x_N = 0$)

$$\Delta x_H = \rho_y \frac{r_y}{r_z} \left(1 - \frac{r_z A_g R_y}{N} \left(1 - \frac{M_y}{r_y W_{g,y} R_y} \right) \right). \quad (5.5)$$

Расчет Δx_H выполняется в следующей последовательности:

- рассчитываются предельные состояния по прочности с учетом фактического распределения напряжений при совместном действии N и M_y в различных сочетаниях (от центрального сжатия до чистого изгиба);
- для каждого сочетания (кроме $N = r_z A_g R_y$, $M_y = 0$, а также кроме $N = 0$, $M_y = r_y W_{g,y} R_y$) рассчитываются значения Δx_H по формуле (5.5);
- в качестве расчетного принимается максимальное по модулю значение.

Значение Δx_H зависит от формы и размеров поперечного сечения и отношения расчетного сопротивления стали к модулю упругости, поэтому может быть рассчитано на этапе разработки сортаментов и приведено в качестве справочных данных.

§5.2.3 Проверка прочности при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом

Расчет на прочность при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом предлагается выполнять по формуле

$$\left(\frac{M_x + \Delta M_x}{r_{x,N} W_{g,n,x} R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_y + \Delta M_y}{r_{y,N} W_{g,n,y} R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (5.6)$$

где $p = \sqrt{\frac{1}{r_x}}$, $q = \sqrt{\frac{1}{r_y}}$ – коэффициенты учёта фактической редукции;

$r_{x(y),N} = r_{x(y)} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_u} \right)$ – коэффициенты редукции сечения при совместном действии N и $M_{x(y)}$.

В формуле (5.6), в отличие от требований действующих норм [2], учитывается действительная форма поверхности прочности «двутавровых» ЛСТК, изолинии $N = Const$ которой для конкретного сечения показаны на рисунке 5.3.

Показатели p и q определяют выпуклость изолиний $N = Const$ поверхности прочности. Аналогичный подход используется в формуле (105) свода правил [1] (см. показатель « n ») для расчета сечений «обычных» элементов (не ЛСТК) в упругопластической стадии. Коэффициентами редукции $r_{x(y),N}$ учитывается снижение предельных значений изгибающих моментов за счет действия продольной силы N , поэтому формула (5.6) справедлива при любых $N \in [0; N_u]$.

При $p = q = 1$ формула (5.6) эквивалентна формуле (8.33) действующих норм [2]. Как видно из предложенных для p и q формул, в отсутствии редукции имеем $p = q = r_x = r_y = r_z = 1$, и формула (5.6) является проверкой прочности в наиболее напряженной точке полного сечения.

Если коэффициенты редукции $r_x < 1$, $r_y < 1$, то формула (5.6) хорошо аппроксимирует действительные изолинии $N = Const$ поверхности прочности «двутавровых» сечений ЛСТК, как показано на рисунке 5.3. При сравнении ре-

зультатов с расчетом по требованиям действующих норм [2] выявлены резервы прочности (в областях, закрашенных зеленым цветом на рисунке 5.3), при этом меньшим значениям коэффициентов редукции соответствуют большие значения резервов прочности. Другими словами, чем больше сечение ослаблено редукцией, тем больше отличается действительная схема редукции при совместном действии изгибающих моментов от комбинации схем редукции, соответствующих раздельному действию моментов. Для диапазона гибкостей пластин, интересных с практической точки зрения, выявленный резерв составляет 10-15%.

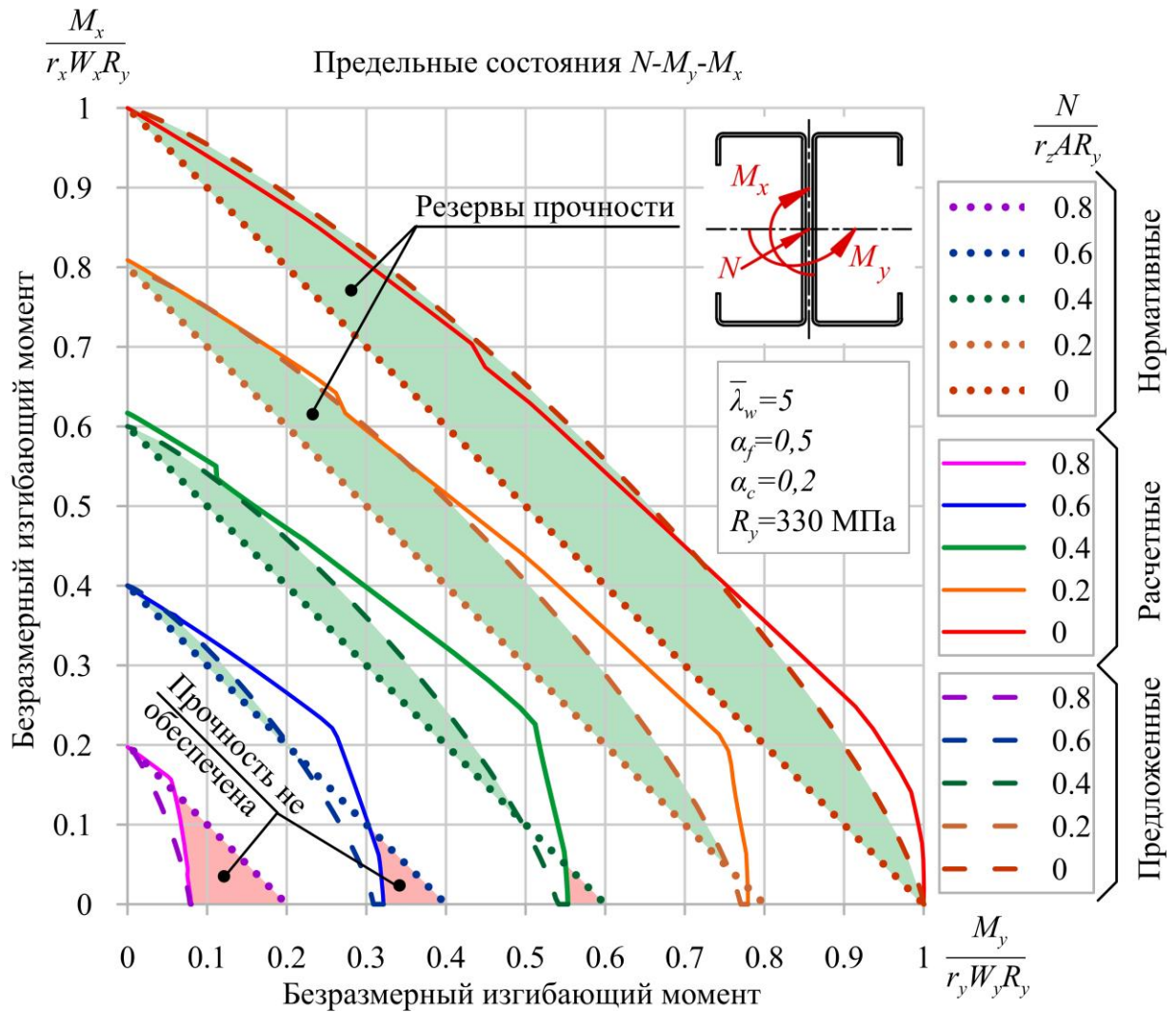


Рисунок 5.3 – Изолинии $N = Const$ поверхности прочности спаренных в двутавр С-профилей.

Также на рисунке 5.3 красным цветом закрашены области, для которых прочность ЛСТК не обеспечена при использовании формулы (8.33) действующих норм [2], т.к. в них не учитывается дополнительный эксцентриситет Δx_H .

Предложенные для показателей p и q формулы получены по результатам расчета спаренных С- и Σ -профилей с различными параметрами формы сечения, различной гибкостью составляющих сечения пластин, для сталей разных марок. При расчете U-профилей (швеллеров) также выявлены резервы прочности, но в меньшей степени. При расчете U-профилей и других сечений, работа которых при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов не была исследована, в запас прочности следует принимать $p = q = 1$.

Смещение центра тяжести редуцированного сечения при совместном действии поперечных сил и изгибающих моментов в двух плоскостях приводит к возникновению крутящих моментов и бимоента, влияние которых на прочность требует дополнительных исследований, поэтому при наличии значительных поперечных сил следует принимать $p = q = 1$.

§5.3. Расчет общей устойчивости

§5.3.1 Проверка устойчивости по изгибной форме

Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии предлагается выполнять по формуле, аналогичной формуле (109) свода правил [1]

$$\frac{N}{\varphi_{e,x(y)} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.7)$$

где $\varphi_{e,x(y)} = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} \leq r_z \frac{r_{x(y)}}{r_{x(y)} + r_z \Delta m_{x(y)}}$ – коэффициент устойчивости;

$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot d$ – дискриминант квадратного уравнения

$$a \cdot \varphi_{e,x(y)}^2 + b \cdot \varphi_{e,x(y)} + d = 0;$$

$$a = 1,234 - 0,234 \left(r_{x(y)} + r_z \left(m_{x(y)} + \Delta m_{x(y)} \right) \right),$$

$$b = -\varphi_{cr,x(y)} \left(r_{x(y)} + r_z \left(m_{x(y)} + \Delta m_{x(y)} \right) \right) - r_z \left(1,234 - 0,234 r_{x(y)} \right),$$

$$d = \varphi_{cr,x(y)} r_{x(y)} r_z - \text{коэффициенты уравнения};$$

$\varphi_{cr,x(y)} = \pi^2 / \bar{\lambda}_{g,x(y)}^2$ – коэффициент устойчивости, соответствующий критической силе по Эйлеру;

$\bar{\lambda}_{g,x(y)} = \frac{l_{ef,x(y)}}{i_{g,x(y)}} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – условная гибкость стержня;

$m_{x(y)} = \frac{M_{x(y)}}{N} \times \frac{A_g}{W_{g,x(y)}} \geq m_{x(y),cl}$ – основной относительный эксцентриситет

продольной силы;

$m_{x(y),cl} = -\alpha_{x(y)} + \beta_{x(y)} \bar{\lambda}_{g,x(y)}$ – случайный относительный эксцентриситет продольной силы;

$\alpha_{x(y)}$ и $\beta_{x(y)}$ – коэффициенты по таблице 7 СП 16.13330.2017 [1] для принятой кривой потери устойчивости;

$\Delta m_x = \pm |\Delta y_N| \frac{A_g}{W_{g,x}}$, $\Delta m_y = (|\Delta x_H| \pm |\Delta x_N|) \frac{A_g}{W_{g,y}}$ – дополнительные относитель-

ные эксцентриситеты от смещения центра тяжести редуцированного сечения (знак для Δx_N и Δy_N принимается по отношению к основному эксцентриситету);

$r_z = A_{ef} / A_g$, $r_{x(y)} = W_{ef,x(y)} / W_{g,x(y)}$ – коэффициенты редукции при сжатии и изгибе, вычисленные при раздельном действии усилий;

A_g , $W_{g,x(y)}$, $I_{g,x(y)}$, $i_{g,x(y)} = \sqrt{I_{g,x(y)} / A_g}$ – площадь, момент сопротивления (минимальный для несимметричного сечения), момент и радиус инерции полного (не редуцированного) поперечного сечения;

R_y – расчетное сопротивление стали;

γ_c – коэффициент условий работы.

Расчет на устойчивость при центральном сжатии предлагается выполнять по формуле, аналогичной формуле (7) свода правил [1]

$$\frac{N}{\varphi_{x(y)} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.8)$$

где $\varphi_{x(y)}$ – коэффициент устойчивости $\varphi_{e,x(y)}$, рассчитываемый в соответствии с примечаниями к формуле (5.7), принимая значение основного относительно-го эксцентриситета равным случайному $m_{x(y)} = m_{x(y),cl}$.

§5.3.2 Проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме

Расчет на устойчивость по изгибно-крутильной форме при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости, а также при сжатии с двухосным эксцентриситетом, предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{cy} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.9)$$

где φ_{cy} – коэффициент устойчивости по изгибно-крутильной форме, равный наименьшему положительному действительному корню уравнения

$$c_4 \cdot \varphi_{cy}^4 + c_3 \cdot \varphi_{cy}^3 + c_2 \cdot \varphi_{cy}^2 + c_1 \cdot \varphi_{cy} + c_0 = 0;$$

$$c_4 = a_3 K_1,$$

$$c_3 = a_2 K_1 + a_3 K_2 + b_2 (r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)),$$

$$c_2 = a_1 K_1 + a_2 K_2 + b_1 (r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)) - b_2 r_x r_z,$$

$$c_1 = a_0 K_1 + a_1 K_2 + b_0 (r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)) - b_1 r_x r_z,$$

$$c_0 = a_0 K_2 - b_0 r_x r_z - \text{безразмерные коэффициенты уравнения};$$

$$K_1 = r_z r_x (m_y + \Delta m_y) - (1 - r_y) (r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)),$$

$$K_2 = r_z r_x (1 - r_y) - \text{безразмерные коэффициенты связи внутренних усилий в предельном состоянии};$$

$$a_3 = 0,0395 (K_e - K_p),$$

$$a_2 = \bar{N}_{cr,y} [0,0395 (K_k + K_\omega) - 0,234 K_p - K_e],$$

$$a_1 = \bar{N}_{cr,y}^2 \left[0,234(K_k + K_\omega) - K_p \right],$$

$$a_0 = \bar{N}_{cr,y}^3 (K_k + K_\omega),$$

$$b_2 = \bar{N}_{cr,y} (K_p - K_e),$$

$$b_1 = -\bar{N}_{cr,y}^2 (K_k + K_p + K_\omega),$$

$b_0 = a_0$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие коэффициент увеличения деформаций в плоскости меньшей жесткости;

$$K_e = \left((m_x + \Delta m_x) \frac{W_{x,g}}{A_g} - a_y \right)^2 \pi^2 / l_{ef,y}^2 - \text{коэффициент, характеризующий экс-}$$

центриситет продольной силы;

$$K_p = \left(i_A^2 + \beta_y (m_x + \Delta m_x) \frac{W_{x,g}}{A_g} \right) \pi^2 / l_{ef,y}^2 - \text{коэффициент, характеризующий}$$

геометрические характеристики, введенные В.З. Власовым;

$$K_k = \frac{GI_{k,g}}{EI_{y,g}}, \quad K_\omega = \frac{I_{\omega,g} \pi^2}{I_{y,g} l_{ef,y}^2} - \text{коэффициенты, характеризующие соотношения}$$

жесткостей при кручении и изгибе;

E и G – модули упругости и сдвига;

$I_{y,g}$, $I_{\omega,g}$ – момент инерции относительно оси «у» и секториальный момент полного (нередуцированного) сечения;

$$I_{k,g} = \frac{\alpha}{3} \sum b_i t_i^3 - \text{момент инерции чистого кручения полного сечения}$$

(b_i и t_i – ширина и толщина пластинок, составляющих поперечное сечение, $\alpha \approx 1$ – коэффициент влияния формы сечения, определяемый, как правило, экспериментально);

$$i_A^2 = i_p^2 + a_y^2 \text{ и } \beta_y = \frac{1}{2I_{x,g}} \oint_A (x^2 + y^2) y dA_g - a_y - \text{геометрические характери-}$$

стики, введенные В.З. Власовым [55];

$$i_p^2 = \frac{I_{p,g}}{A_g} = \frac{I_{x,g} + I_{y,g}}{A_g} - \text{квадрат полярного радиуса инерции};$$

a_y – координата центра изгиба (см. рисунок 3.1).

Расчет по формуле (5.9) предполагает большое количество промежуточных вычислений и расчет корней уравнения 4-ой степени, но, как будет показано ниже, позволяет учитывать значительные резервы устойчивости стержней, поэтому он будет полезен при автоматизации расчетов элементов в специализированном программном обеспечении.

§5.3.3 Упрощенная проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме

Расчет на устойчивость по изгибно-крутильной форме при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости, а также при сжатии с двухосным эксцентриситетом, предлагается выполнять по упрощенной формуле, аналогичной формуле (111) свода правил [1]

$$\frac{N}{c \varphi_{e,y} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (5.10)$$

где $\varphi_{e,y}$ – коэффициент устойчивости по изгибной форме в плоскости меньшей жесткости, определяемый в соответствии с примечаниями к формуле (5.7);

$$c = \frac{\varphi_{e,y}^*}{\varphi_{e,y}} \leq \frac{\varphi_{e,y,\pi}^*}{\varphi_{e,y,\pi}} - \text{коэффициент, учитывающий влияние изгибающего мо-}$$

мента в плоскости большей жесткости;

$\varphi_{e,y}^*$ – коэффициент устойчивости по изгибной форме в плоскости меньшей жесткости, определяемый в соответствии с примечанием к формуле (5.7) при значении коэффициента редукции r_z^* ;

$$r_z^* = r_z \frac{r_x}{r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)} - \text{эквивалентный коэффициент редукции, учитыва-}$$

ющий влияние m_x на прочность при малых значениях гибкости;

$\varphi_{e,y,\pi}$ и $\varphi_{e,y,\pi}^*$ определяются аналогично $\varphi_{e,y}$ и $\varphi_{e,y}^*$, но при значении гибкости $\bar{\lambda}_{g,y} = \pi$.

Значения коэффициента «с» получены таким образом, чтобы кривая устойчивости при внецентренном (или центральном) сжатии в плоскости меньшей жесткости аппроксимировала кривую устойчивости по изгибно-крутильной форме.

При гибкостях $\bar{\lambda}_{g,y} < \pi$, когда влияние закручивания незначительное, снижение устойчивости в плоскости меньшей жесткости при действии момента M_x связано, прежде всего, с уменьшением предельной продольной силы, воспринимаемой сечением, и учитывается коэффициентом r_z^* . Результаты расчета по формулам (5.9) и (5.10) в этом диапазоне гибкостей практически идентичны.

При гибкостях $\bar{\lambda}_{g,y} > \pi$, когда закручивание сказывается сильнее, снижение устойчивости в плоскости меньшей жесткости при действии момента M_x связано, прежде всего, с перераспределением изгибающего момента из плоскости большей жесткости в плоскость меньшей жесткости (с математической точки зрения увеличивается деформационный коэффициент $K_{d,y}$). Пользуясь тем, что линия $\varphi_{cy} = f(\bar{\lambda}_{g,y})$ всегда более пологая, чем линия $\varphi_{e,y} = f(\bar{\lambda}_{g,y})$, а также тем, что $\varphi_{cy} \approx \varphi_{e,y}^*$ в точке $\bar{\lambda}_{g,y} = \pi$, линия $\frac{\varphi_{e,y,\pi}^*}{\varphi_{e,y,\pi}} \cdot \varphi_{e,y} = f(\bar{\lambda}_{g,y})$ оказывается, в запас устойчивости, ниже, чем $\varphi_{cy} = f(\bar{\lambda}_{g,y})$ для любых значений $\bar{\lambda}_{g,y} > \pi$.

Для расчета коэффициента «с» не требуется большое количество промежуточных вычислений, при этом точность получаемых результатов при $\bar{\lambda}_{g,y} > \pi$ сопоставима с точностью расчета по европейскому методу [122], используемому в своде правил [2].

§5.3.4 Сравнительный анализ и верификация результатов

Покажем отличие результатов расчета устойчивости по разработанному методу от расчета по требованиям действующих норм [2] (см. рисунки 5.4–5.7) на примере спаренного С-профиля со следующими параметрами:

- расчетное сопротивление стали $R_y = 330$ МПа;
- гибкость стенки $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 6,0$;
- параметры формы сечения $\alpha_f = b_f / h_w = 0,4$, $\alpha_c = h_c / b_f = 0,2$;
- зазор между стенками $3t$;
- коэффициенты редукции $r_z = 0,383$, $r_x = 0,557$, $r_y = 0,633$;
- эксцентриситеты $\Delta m_y = |\Delta x_H| A / W_y = 0,254$, $\Delta x_N = \Delta y_N = 0$.

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии показан на рисунке 5.4. При расчете в плоскости меньшей жесткости учитывается дополнительный эксцентриситет Δx_H , при чем как при расчете по разработанным методам, так и по нормативному методу (для корректного сопоставления).

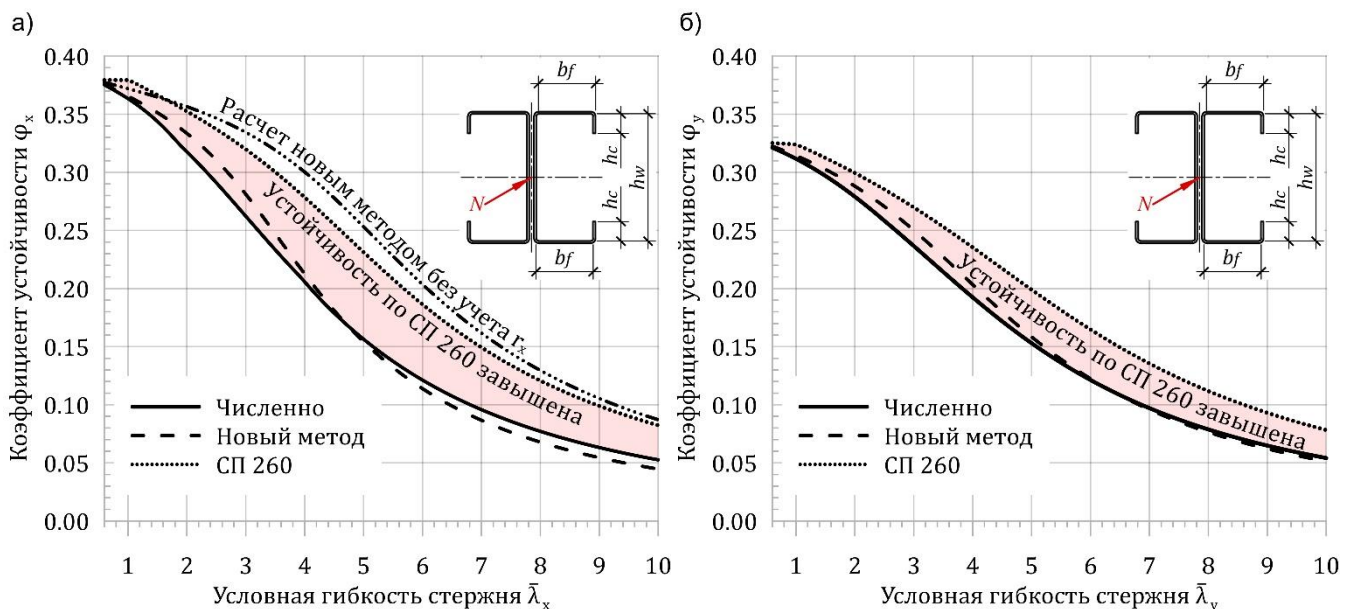


Рисунок 5.4 – Коэффициенты устойчивости при центральном сжатии:

а) в плоскости большей жесткости; б) в плоскости меньшей жесткости.

Предложенный практический метод расчета хорошо согласуется с численно-аналитическим методом, который верифицирован в четвертой главе диссертации. Предложенный практический метод расчета учитывает редуцированные моменты сопротивления коэффициентами r_x и r_y . Нормативным методом расчета устойчивости при центральном сжатии не учитываются редуцированные моменты сопротивления, поэтому оценка оказывается завышена. При расчете новым практическим методом с использованием $r_x = 1$ (см. линию «Расчет новым методом без учета r_x » на рисунке 5.4а) результаты согласуются с нормативным методом, что подтверждает вывод.

Коэффициент устойчивости по изгибной форме при внецентренном сжатии показан на рисунке 5.5.

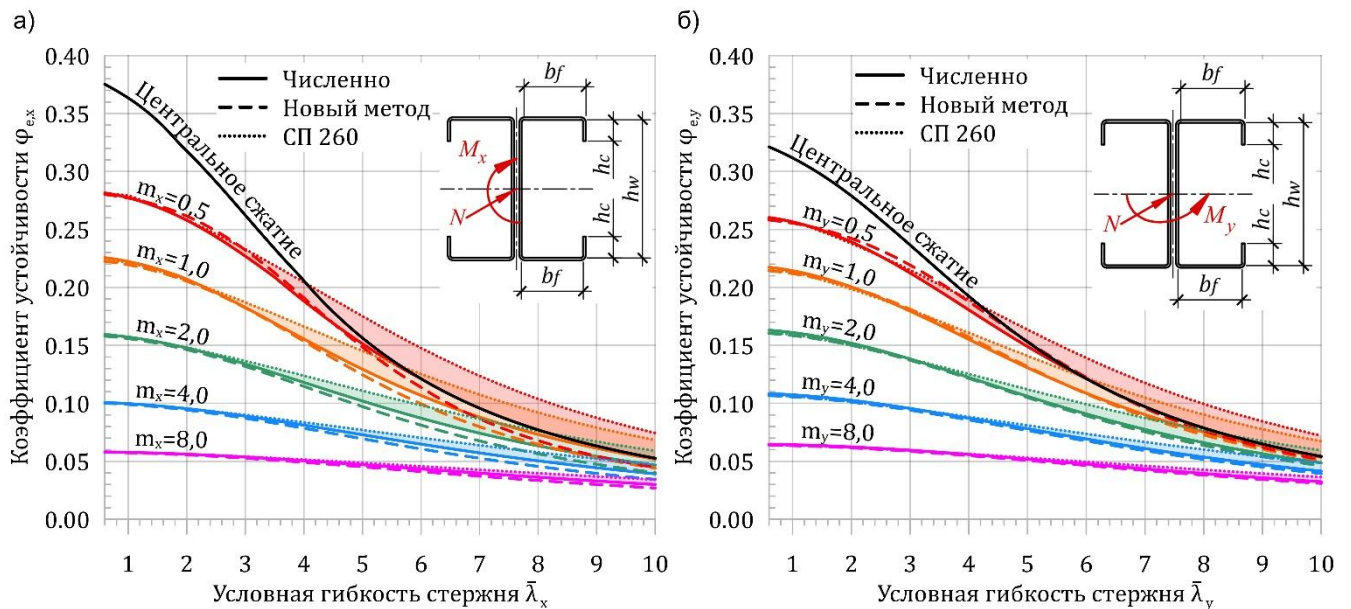


Рисунок 5.5 – Коэффициенты устойчивости по изгибной форме при внецентренном сжатии: а) в плоскости большей жесткости; б) в плоскости меньшей жесткости.

Предложенный практический метод расчета, как и при центральном сжатии, хорошо согласуется с численно-аналитическим методом, который верифицирован в четвертой главе диссертации. При малых эксцентриситетах, когда основной вклад дает случайный эксцентриситет из расчета центрально-сжатого стержня, нормативный метод расчета завышает оценку устойчивости, но при увеличении эксцентриситета нагрузки нормативный метод хорошо согласуется с другими.

Так как результаты расчетов устойчивости по изгибной форме при центральном и внецентренном сжатии в плоскости меньшей жесткости новым практическим и численно-аналитическим методами хорошо согласуются, использование дополнительного эксцентриситета Δx_H позволяет не учитывать коэффициенты условий работы $\gamma_c = 0,75 \dots 0,95$, предусмотренные действующими нормами [2] для расчета сжатых спаренных U-, C- и Σ -профилей.

Коэффициенты устойчивости по изгибно-крутильной форме показаны на рисунке 5.6.

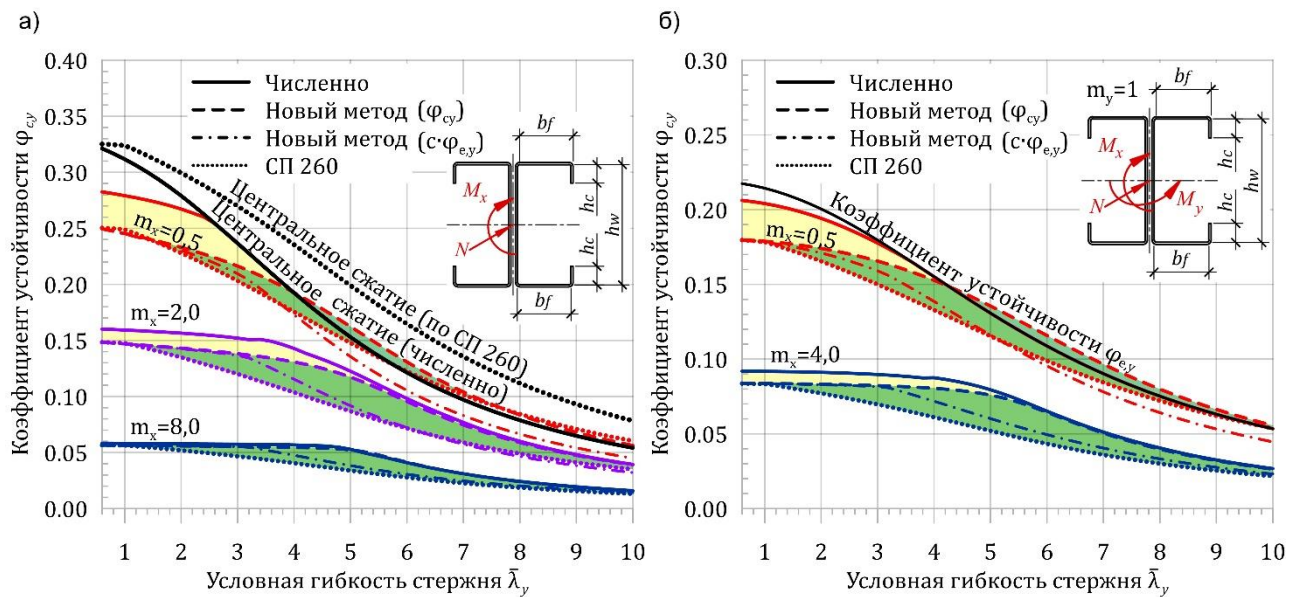


Рисунок 5.6 – Коэффициенты устойчивости по изгибно-крутильной форме при внецентренном сжатии: а) в плоскости большей жесткости; б) с двухосным эксцентриситетом.

Новый практический метод расчета по формуле (5.9) дает более консервативное решение, чем численно-аналитический метод, который верифицирован в четвертой главе диссертации, при этом максимальные отклонения возникают при малых гибкостях и эксцентриситетах, но результаты хорошо согласуются при средних и больших значениях гибкостей и эксцентриситетов.

Расчет в соответствии с действующими нормами [2] согласуется с новым практическим методом при малых гибкостях, но в среднем диапазоне гибкостей оценка устойчивости оказывается занижена. Это связано с тем, как учитывается в

нормативном методе расчета негативное влияние от закручивания стержня: вместо увеличения изгибающего момента M_y увеличивается момент M_x , что противоречит физическому смыслу явления и негативно сказывается на точности.

Расчет по формуле (5.10) дает более консервативное решение, чем расчет по формуле (5.9), при этом результаты расчета по формуле (5.10) близки к результатам расчета нормативным методом.

Расчет по формуле (5.9) позволяет учитывать значительные резервы устойчивости. На рисунке 5.7 показана относительная разность $\frac{\varphi_{cy} - \varphi_{cy}^{EN}}{\varphi_{cy}^{EN}} \times 100\%$, где φ_{cy} рассчитывается в соответствии с примечаниями к формуле (5.9), а φ_{cy}^{EN} – значение коэффициента устойчивости, соответствующее нормам [2].

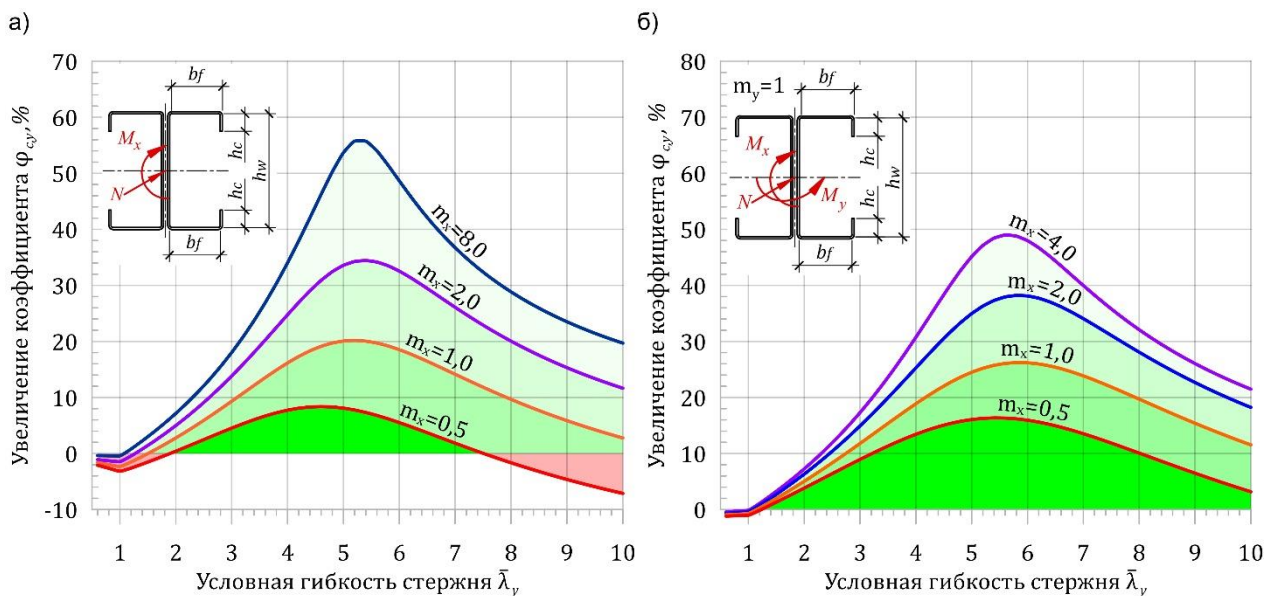


Рисунок 5.7 – Эффективность применения нового метода расчета устойчивости при внецентренном сжатии по сравнению с европейской методикой.

В работе [102] также было отмечено, что относительные показатели резервов устойчивости по изгибно-крутильной форме могут составлять десятки процентов.

Численно-аналитический метод, который был использован при разработке нового практического метода расчета, лишен недостатков, отмеченных автором диссертации при анализе нормативного метода в статье [34].

В главе 4 показано, что численно-аналитический метод, на основе которого разработан практический метод расчета, очень хорошо согласуется с результатами расчетов методом конечных элементов. Путем сравнения результатов расчета с результатами проведенных испытаний определено, что численно-аналитический метод обеспечивает в достаточной степени консервативную оценку общей устойчивости.

Практический метод в силу принятых допущений отклоняется от численно-аналитического в сторону запаса устойчивости, но по сравнению с действующим нормативным методом учитывает снижение устойчивости гибких стержней за счет снижения предельного изгибающего момента от потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения, а также позволяет учитывать существенные запасы устойчивости по изгибно-крутильной форме.

§5.4. Выводы по главе

1. Метод проверки прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК свода правил СП 260.1325800.2023 [2], заимствованный из европейских норм проектирования [113] [114], обладает рядом существенных недостатков: оценка устойчивости при центральном сжатии для гибких элементов оказывается несколько завышенной, а оценка устойчивости при внецентренном сжатии по изгибно-крутильной форме – заниженной в силу принятых при его разработке допущений [122], нарушающих физический смысл явления, что отмечено в работе [34]. Кроме того, этот метод не гармонизирован с отечественным сводом правил СП 16.13330.2017 [1] и требует большого количества промежуточных вычислений, затрудняющих его использование.
2. Предложен новый практический метод расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, основанный на хорошо проработанной технической и деформационной теории тонкостенных стержней открытого профиля. Фактическая редукция сечения при совместном действии усилий учитывается коэффициентами редукции сечения и дополнительными эксцен-

триситетами, которые рассчитываются при раздельном действии усилий и могут быть приведены в сортаментах, что позволяет упростить проектирование ЛСТК.

3. Разработанный практический метод гармонизирован с отечественным сводом правил [1], при чем коэффициенты устойчивости элемента ЛСТК по изгибной (при центральном и внецентренном сжатии) и изгибно-крутильной формам рассчитываются аналитически.
4. Результаты расчетов хорошо согласуются с численно-аналитическими расчетами, численными расчетами методом конечных элементов и подтверждаются результатами проведенных испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан быстродействующий «обратный» численный метод расчета предельных напряженно-деформированных состояний в поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий. Расчет производится в безразмерных параметрах по фактической редукции сечения, учитывающей потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения.
2. Разработан быстродействующий «обратный» численно-аналитический метод расчета общей устойчивости элемента ЛСТК, сжатого с заданными опорными эксцентриситетами, в котором фактическая редукция сечения по методу упругих решений компенсируется догрузением фиктивными силами.
3. Обратный численно-аналитический метод расчета устойчивости верифицирован путем сравнения полученных с его помощью результатов с результатами расчетов методом конечных элементов при использовании аналогичной схемы редукции сечения.
4. Выявлены резервы общей устойчивости элементов ЛСТК по изгибно-крутильной форме, возникающие в силу принятых при разработке нормативного метода расчета [122] допущений, нарушающих физический смысл явления.
5. Разработан практический метод расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК по изгибной (при центральном и внецентренном сжатии) и изгибно-крутильной формам, который гармонизирован с отечественным сводом правил, хорошо согласуется с численно-аналитическим методом расчета и позволяет учитывать резервы устойчивости по изгибно-крутильной форме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 16.13330.2017. Конструкции стальные. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2023.
2. СП 260.1325800.2023. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2023.
3. Айрумян Э. Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль». М.: ЦНИИСК им. Мельникова, 2004. 69 с.
4. Айрумян Э. Л., Белый Г.И. Исследование работы стальной фермы из холодногнутых профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 41–44.
5. Аскинази В. Ю. Пространственная устойчивость элементов стальных рамных конструкций переменной жесткости: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб, 2017. 199 с.
6. Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2006. 123 с.
7. Бейлин Е. А. Об устойчивости плоской формы изгиба тонкостенных балок, имеющих упругие диафрагмы на торцах // Сборник докладов XX научной конференции ЛИСИ «Инженерные конструкции, сопротивление материалов, строительная механика». 1962. С. 56–61.
8. Бейлин Е. А. Общие уравнения деформационного расчета и устойчивости тонкостенных стержней. // Строительная механика и расчет сооружений. 1969. № 5. С. 35–41.
9. Бейлин Е. А. Обобщение уравнений Кирхгофа-Клебша для тонких и тонкостенных стержней // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1969. № 62. С. 5–19.
10. Бейлин Е. А. К теории деформационного расчета и устойчивости криволинейных и прямолинейных тонкостенных стержней // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1970. № 63. С. 5–19.
11. Бейлин Е. А. Статика и динамика тонкостенных стержней с криволинейной осью (деформационный расчет, устойчивость, колебания и учет эффекта Кармана): дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Л., 1972. 318с.
12. Бейлин Е. А., Белый Г. И. Деформационный расчет и пространственные формы потери устойчивости тонкостенных криволинейных стержней // Сопротивление материалов и теория сооружений. 1972. № 16. С. 186–189.

13. Бейлин Е. А., Белый Г. И. К деформационному расчету упругих систем, подверженных одновременному действию активных и параметрических нагрузок // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. № 3. С. 30–34.
14. Бейлин Е. А., Кузнецов С. Е. О деформационном расчете тонкостенных прямолинейных стержней в упругой среде // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1981. № 14. С. 73–82.
15. Белый Г.И. О расчете упругих стержней по деформированной схеме при действии активных и параметрических нагрузок // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1980. С. 41–48.
16. Белый Г. И. О расчете пространственно-деформируемых стержневых элементов металлических конструкций // Металлические конструкции и испытания сооружений. 1981. № 21. С. 48–55.
17. Белый Г. И. Расчет металлических стержневых элементов, входящих в состав конструкции по пространственно-деформированной схеме // Металлические конструкции и испытания сооружений. 1983. № 32. С. 42–48.
18. Белый Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме // Строительная механика сооружений. 1983. № 42. С. 40–48.
19. Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме с учетом касательных напряжений и деформаций сдвига // Металлические конструкции и испытания сооружений. 1985. № 62. С. 10–20.
20. Белый Г. И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 Л., 1987. 358 с.
21. Белый Г. И. Особенности работы стержневых элементов конструкций из оцинкованных гнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3 (32). С. 99–103.
22. Белый Г. И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутох профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 46–51.
23. Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 33–37.
24. Белый Г. И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутох профилей // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 75–80.

25. Белый Г. И. К расчету на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 4 (75). С. 13–17.
26. Белый Г. И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3 (80). С. 43–54.
27. Белый Г. И. Аналитически-численный метод расчёта на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 39–46.
28. Белый Г. И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55.
29. Белый Г. И., Ведерникова А. А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 26–35.
30. Белый Г. И., Гарипов А. И. Запредельные напряженно-деформированные состояния в поперечных сечениях элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 16–30.
31. Белый Г. И., Гарипов А. И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций после потери общей устойчивости // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5 (94). С. 5–19.
32. Белый Г. И., Гарипов А. И. Совершенствование расчета элементов стальных конструкций на прочность при общем нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 24–33.
33. Белый Г. И., Гарипов А. И. Теоретические основы проверки устойчивости тонкостенных элементов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 4. С. 33–42.
34. Белый Г. И., Гарипов А. И. Новый практический метод проверки устойчивости тонкостенных элементов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 5. С. 20–30.
35. Белый Г. И., Кузнецов А. Ю. Влияние редукции сечения на устойчивость стержневых элементов конструкций из спаренных холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 57–63.
36. Белый Г. И., Лобовский М. О. Устойчивость ветвей решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 18–29.
37. Белый Г. И., Матвеев Е. А. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 544–556.

38. Белый Г. И., Родиков Н. Н. О пространственной деформации тонкостенных стержней, сжатых с двухосными эксцентриситетами // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. 1982. № 32. С. 30–36.
39. Белый Г. И., Смирнов М. О. Совершенствование инженерной методики расчета на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 1 (78). С. 72–81.
40. Белый Г. И., Смирнов М. О. Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 57–68.
41. Бельский Г. Е. Устойчивость сжатых стальных стержней с упругими защемлениями концов. М.: Госстройиздат, 1959. 148 с.
42. Бельский Г. Е. О качественном исследовании устойчивости сжато-изогнутых стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 2. С. 23–37.
43. Бельский Г. Е. Применение вариационного принципа в задачах устойчивости сжато-изогнутых стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 6. С. 24–28.
44. Бельский Г. Е. Об устойчивости сжато-изогнутых стержней с учетом продольного сближения опор // Строительная механика и расчет сооружений. 1971. № 1. С. 38–44.
45. Биргер Е. А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности и ползучести // Прикладная механика и математика. 1966. № 2. С. 61–73.
46. Броуде Б. М. Устойчивость пластинок в элементах стальных конструкций М.: Машстройиздат, 1949. 380 с.
47. Броуде Б. М. О линеаризации уравнений устойчивости равновесия внецентренно-сжатого стержня // Исследования по теории сооружений. 1959. Вып. 8. С. 205–223.
48. Броуде Б. М. Об устойчивости стержней, сжатых с двухосным эксцентриситетом // Расчет пространственных конструкций. 1959. Вып. 5. С. 37–50.
49. Броуде Б. М. К теории тонкостенных стержней открытого профиля // Строительная механика и расчет сооружений. 1960. № 5. С. 6–11.
50. Броуде Б. М., Моисеев В. И. Об устойчивости стенки двутавровой балки // Строительная механика и расчет сооружений. № 4. 1978. С. 55–57.
51. Броуде Б. М., Моисеев В. И. Устойчивость прямоугольных пластинок с упругим защемлением продольных сторон // Строительная механика и расчет сооружений. 1982. № 1.
52. Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Одесский П. Д. Несущая способность болтовых соединений легких конструкций из холодногнутых профилей малых толщин // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 3. С. 19–22.

53. Власов В. З. Новый метод расчета призматических балок из тонкостенных профилей на совместное действие изгиба и кручения // Вестник ВИА РККА. 1936. № 20. С. 86–135.
54. Власов В. З. Кручение и устойчивость тонкостенных открытых профилей // Строительная промышленность. 1938. № 6. С. 49–53.
55. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 566 с.
56. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки. М: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. 419 с.
57. Воробьев Л. Н. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных стержней открытого профиля // Сборник научных трудов Новочеркасского политехнического института. 1958. Т. 69/93. С. 3–48.
58. Воронцов Г. В. Малые пространственные колебания, устойчивость и устойчивая прочность тонкостенных стержней открытого профиля // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1965. № 1. С. 44–49.
59. Вязьменский С. П. О граничных условиях в теории тонкостенных стержней // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1969. № 60. С. 20–29.
60. Вязьменский С. П. О пространственной деформации гибких тонкостенных стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1957. Вып. 26. С. 270–313.
61. Вязьменский С. П. Приближенное решение задачи о расчете прямолинейных упругих стержней по деформированному состоянию // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1966. № 49. С. 268–285.
62. Гарипов А. И. Усовершенствованный инженерный метод проверки прочности ЛСТК // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 6 (107). С. 33–44.
63. Гарипов А. И. Определение параметров деформированного состояния в сечении при расчете стержневых элементов стальных конструкций обратным методом // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 29–37.
64. Геммерлинг А. В. Несущая способность сжатых и сжато-изогнутых элементов стальных конструкций // Сборник ЦНИПС «Экспериментальные исследования стальных конструкций» под ред. В. А. Балдина. М.: Стройиздат, 1950. С. 5–69.
65. Геммерлинг А. В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. М.: Госстройиздат, 1958. 212 с.
66. Геммерлинг А. В. Расчет стержневых систем. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.
67. Гольденвайзер А. Л. О теории тонкостенных стержней // Прикладная математика и механика. 1949. Т. 13. Вып. 6. С. 561–596.
68. Зарифьян А. З. К вопросу о деформационном расчете внецентренно-сжатых тонкостенных стержней открытого профиля // Труды Новочеркасского политехнического института. 1958. Т. 49/63. С. 60–76.

69. Зарифьян А. З. Предельные состояния тонкостенных элементов металлических конструкций // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. 1977. № 3. С. 91–95.
70. Зарифьян А. З. Расчет по деформированной схеме и определение несущей способности тонкостенных стержней открытого профиля // Прочность, устойчивость и колебания инженерных конструкций. 1974. Т. 305. С. 35–42.
71. Зарифьян А. З., Дудченко А. Н. Деформационный расчет и определение несущей способности внецентренно сжатых тонкостенных стержней // Прочность, устойчивость и колебания инженерных конструкций. 1974. Т. 305. С. 51–57.
72. Экспериментальные исследования рамных конструкций из холодногнутых профилей повышенной жесткости / Зверев В. В., Жидков К. Е., Семенов А. С., Сотникова И. В. // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2011. № 4 (24). С. 20–24.
73. Ильюшин А. А. Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
74. Катранов И. Г. Болты или самосверлящие винты в соединениях ЛСТК // Монтажные и специальные работы строительстве. 2011. № 5. С. 12–14.
75. Катранов И. Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. М., 2011. 197 с.
76. Коломиец В. П. Метод определения напряжений и деформаций в сечении балки при сложном нагружении с учетом действительной диаграммы s-e // Авиационная техника. 1966. № 1. С. 63–71.
77. Крылов А. Н. О формах равновесия сжатых стоек при продольном изгибе // Известия АН СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1931. № 7. С. 963–1012.
78. Кузнецов А. Ю. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов из холодногнутых оцинкованных профилей // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 56–60.
79. Кузнецов А. Ю. Прочность и пространственная устойчивость составных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2013. 141 с.
80. Лейтес С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Госстройиздат, 1954. 308 с.
81. Лейтес С. Д. О мгновенной жесткости сечения при упругопластических деформациях // Строительная механика и расчет сооружений. 1963. № 6. С. 26–29.
82. Лейтес С. Д., Раздольский А. Г. Исследование устойчивости внецентренно-сжатых упругопластических стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 1. С. 1–5.

83. Михаськин В. В. Влияние сварочных процессов на пространственную устойчивость усиливаемых под нагрузкой элементов стержневых конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2010. 214 с.
84. Моисеев В. И. Устойчивость за пределом упругости внецентренно сжатых пластинок, имеющих свободный край // Строительная механика и расчёт сооружений. 1975. № 4. С. 70–73.
85. Моисеев В. И. Расчет на местную устойчивость стальных балок за пределом упругости // Строительная механика и расчет сооружений. 1982. № 6. С. 43–46.
86. Моисеев В. И. Расчет местной устойчивости внецентренно сжатых стержней за пределом упругости // Промышленное строительство. 1983. № 12. С. 30–31.
87. Моисеев В. И. К расчету местной устойчивости балок при значительном развитии пластически деформаций // Строительная механика и расчет сооружений. 1984. № 2. С. 27–29.
88. Моисеев В. И. Расчет местной устойчивости при внецентренном сжатии с учетом равноустойчивости стержня и элементов его сечения // Издательство вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 11. С. 13–16.
89. Моисеев В. И. Экспериментальное исследование устойчивости стенок балок, работающих за пределом упругости // Строительная механика и расчет сооружений. 1985. №2. С. 65–68.
90. 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: 05.23.01. М., 1988.
91. Быстровозводимые малоэтажные жилые здания с применением легких стальных тонкостенных конструкций / Павлов А.Б., Айрумян Э. Л., Камынин С. В., Каменщиков Н.И. // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 51–53.
92. Пиковский А. А. Статика стержневых систем со сжатыми элементами. М.: Физматгиз, 1961. 394 с.
93. Редуцирование площади поперечного сечения тонкостенного стального профиля при центральном сжатии / Подзоров А. В., Зверев В. В., Тезиков Н. Ю., Жидков К. Е., Карманов И. В. // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6 (263). С. 24–28.
94. Пяткин П. А. Прочность и пространственная устойчивость усиленных под нагрузкой стержневых элементов конструкций открытого сечения : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2000. 139 с.
95. Репман Ю. В. Устойчивость плоской формы изгиба тонкостенных стержней // Труды лаборатории строительной механики ЦНИПС. М., 1941. С. 181–192.

96. Ржаницын А. Р. К вопросу о мгновенной жесткости сечения // Строительная механика и расчет сооружений. 1966. № 2. С. 7–10.
97. Родиков Н. Н. Устойчивость сжатых с двухосными эксцентриситетами стержневых элементов конструкций из открытых профилей : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Л., 1987. 143 с.
98. Рыбаков В. А. Напряженно-деформированное состояние и несущая способность легких стальных конструкций при стесненном кручении: дис. ... д-ра тех. наук: 2.1.9. СПб., 2024. 389 с.
99. Скрипникова Р. А. Пространственное деформирование неупругого тонкостенного стержня, внецентренно сжатого с двухосным эксцентриситетом // Строительная механика и расчет сооружений. 1974. № 3. С. 32–35.
100. Смирнов М. О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 59–67.
101. Смирнов М. О. Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 46–52.
102. Смирнов М. О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с фактически редуцированным сечением: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2021. 157 с.
103. Соболев Ю. В. Теория стальных строительных конструкций. СПб.: Политехника, 2021. С. 76–86.
104. Стрелецкий Н. С. Работа сжатых стоек. Материалы к курсу стальных конструкций. М.: Госстройиздат, 1959. Выпуск 2. Часть 1. 283 с.
105. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек // Избранные работы под редакцией Э. Н. Григолюка. М: Наука, 1971. 808 с.
106. Туснин А. Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М.: АСВ, 2009. 143 с.
107. Туснин А. Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2009. Т. 15. № 1. С. 73–78.
108. Туснин А. Р. Применение тонкостенного конечного элемента при расчёте прогона открытого профиля // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 405–408.
109. Шкловский Е. И. Исследование стальных профилированных настилов для кровельных покрытий промышленных зданий: дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск, 1973.
110. Эйлер Л. Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума либо минимума или решение изопериметрической задачи, взятой в

самом широком смысле. Приложение I. «Об упругих кривых». М.: Гостехиздат, 1934. С. 447–572.

Источники на иностранных языках:

111. Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members. New York: American Iron and Steel Institute, 1946. 40 p.
112. ANSI/SDI AISI S100-2024 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Florence: Steel Deck Institute, 2024.
113. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
114. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
115. EN 1993-1-5:2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
116. Bambach M. R., Rasmussen K. J. R. Tests on Unstiffened Elements Under Combined Bending and Compression. Research Report R818. Sydney: University of Sydney, Department of Civil Engineering, 2002.
117. Bambach M. R., Rasmussen K. J. R. Elastic and Plastic Effective Width Equations for Unstiffened Elements. Research Report R819. Sydney: University of Sydney, Department of Civil Engineering, 2002.
118. Bambach M. R., Rasmussen K. J. R. Design Methods for Thin-Walled Sections Containing Unstiffened Elements. Research Report R820. Sydney: University of Sydney, Department of Civil Engineering, 2002.
119. Beer H., Schulz G. The European column curves // IABSE reports of the working commissions. 1975. № 23. P. 385–398.
120. Bijlaard P. P., Fisher G. P. Interaction of Column and Local Buckling // NACA TN 2640. 1952.
121. Bleich F. Buckling Strength of Metal Structures. New York: McGraw-Hill Book Co., 1952.
122. New interaction formulae for beam-columns in Eurocode 3: The French–Belgian approach / Boissonnade N., Jaspart J., Muzeau J., Villette M. // Journal of Constructional Steel Research. 2004. № 60. P. 421–431.
123. Brent R. P. Algorithms for Minimization without Derivatives. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1973. 195 p.
124. Broyden C. G. A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations // Mathematics of Computation. 1965. Vol. 19 (92). P. 577–593.

125. Bulson P. S. The stability of flat plates. New York: American Elsevier Pub. Co., 1969.
126. Cheung M. S., Cheung Y. K. Analysis of curved box girder bridges by finite strip method // IABSE publications. 1971. № 31. P. 1–19.
127. Chilver A. H. The behaviour of thin-walled structural members in compression // Engineering. 1951. V. 172. №. 4466. P. 281–282.
128. Chilver A. H. The stability and strength of thin-walled steel struts // The engineer. 1953. V. 196. № 5089. P. 180–183.
129. Cohen J. M., Peköz T. B Local Buckling Behavior of Plate Elements. Research Report. Ithaca: Cornell University, 1987.
130. Desmond T. P. The behavior and strength of thin-walled compression elements with longitudinal stiffness: Ph. D. Thesis. Ithaca: Cornell University, 1977.
131. Desmond T. P., Peköz T. B, Winter G. Edge Stiffeners for Thin-Walled Members // Journal of the Structural Division, ASCE. 1981. Vol. 107. № ST2.
132. Desmond T. P., Peköz T. B, Winter G. Intermediate Stiffeners for Thin-Walled Members // Journal of the Structural Division, ASCE. 1981. Vol. 107. № ST4.
133. DeWolf J. T., Pekoz T., Winter G. Local and overall buckling of cold-formed members // Journal of the structural Division. 1974. V. 100. №. 10. P. 2017-2036.
134. Dwight J. B. Aluminum sections with lipped flanges and their resistance to local buckling // Proceedings, Symposium on Aluminum in Structural Engineering, London. 1963.
135. Fan S. C., Cheung Y. K. Static Analysis of Right Box Girder Bridges by the Spline Finite Strip Method // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1983. V. 75. №. 2. P. 311–323.
136. Harvey J. M. Structural strength of thin-walled channel sections // Engineering. 1953. V. 175. P. 291–293.
137. Jezek K. Die Festigkeit von Druck Stäben aus Stahl. Wien: Julius Springer, 1937.
138. Karman T., Sechler E. E., Donnel L. H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division. 1932. P. 53–57.
139. Karren K. W., Winter G. Effects of cold-forming on light-gage steel members // Journal of the Structural Division. 1967. V. 93. №. 1. P. 433–469.
140. Kenedi R. M., Chilver A. H., Griffin E. Cold formed sections in Britain: research and its application to design // IABSE publications. 1960. № 20. P. 137–150.
141. Koiter W. T. Introduction to the post-buckling behaviour of flat plates // Proceedings du Colloque International sur le Comportement Postcritique des Plaques Utilisées en Construction Métallique, Liège. 1962.
142. Lau S. C. W., Hancock G. J. Distortional buckling formulas for channel columns // Journal of Structural Engineering. 1987. V. 113. №. 5. P. 1063–1078.

143. Lau S. C. W., Hancock G. J. Inelastic buckling of channel columns in the distortional mode // *Thin-Walled Structures*. 1990. V. 10. №. 1. P. 59–84.
144. Li Z., Schafer B. W. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM conventional and constrained finite strip methods // *Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 2010. №2. P. 17–31
145. Michell A. Elastic stability of long beams under transverse forces // *Philosophical Magazine and Journal of Science*. London, 1899. Vol. 48.
146. Nylander E. Torsion, Bending and lateral buckling of I-beams. Göteborg, 1956. 140 p.
147. Pekoz T. Post buckling interaction of plate elements // *Progress report to Swedish Building Research Council, Department of Structural Engineering*. Ithaca: Cornell University, 1977.
148. Peköz T. B. Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members // *Proceedings of the Eighth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. Rolla: University of Missouri-Rolla, 1986.
149. Peköz T. B. Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members. Report SG 86-4. New York: American Iron and Steel Institute, 1986.
150. Prandtl L. Kipp-erscheinungen. Ein fall von instabilem elastischem Gleichgewicht. Inaugural Dissertation d. Phil. Fakultät: Sekt. IId. Ludwigs-Maximilians-Universität München, 1899.
151. Numerical Recipes. The art of Scientific Computing. 3rd edition. / Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. // New York: Cambridge University Press, 2007. P. 442–486.
152. Rhodes J., Harvey J. M. Interaction behaviour of plain channel columns under concentric or eccentric loading // *Proceedings of the 2nd International Colloquium on the Stability of Steel Structures*, Liege. 1977. P. 439–444.
153. Ridders C. J. F. A New Algorithm for Computing a Single Root of a Real Continuous Function // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1979. Vol. CAS-26. P. 979–980.
154. Scalzi J. B. Light-gage cold-formed structures // *IABSE congress report*. 1968. № 8. P. 137-145.
155. Schafer B. W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns // *Journal of structural engineering*. 2002. V. 128. №. 3. C. 289–299.
156. Schafer B. W. Designing Cold-Formed Steel Using the Direct Strength Method. // *18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 2006.
157. Schafer B. W. Cold-formed steel structures around the world: A review of recent advances in applications, analysis and design // *Steel Construction*. 2011. V. 4. № 3. P. 1–9.

158. Schafer B. W., Adany S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods // Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL. 2006.
159. Schafer B. W., Pekoz T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // Journal of constructional steel research. 1998. V. 47. № 3. P. 193–210.
160. Sharp M. L. Longitudinal stiffeners for compression members // Journal of the Structural Division. 1966. V. 92. №. 5. P. 187–211.
161. Stowell E. Z. Compressive strength of flanges // National Advisory Committee for Aeronautics. 1951. Report 1029.
162. Winter G. Stress Distribution in and Equivalent Width of Flanges of Wide, Thin-Walled Steel Beams. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1940. Technical Note № 784.
163. Winter G. Strength of thin steel compression flanges // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1947. V. 112. №. 1. P. 527–554.
164. Winter G. Performance of thin steel compression flanges // IABSE congress report. 1948. № 3. P. 137–148.
165. Winter G. Light-gauge (thin-walled) steel structures for buildings in the United States of America // IABSE congress report. 1952. № 4. P. 523–538.
166. Winter G. Cold-Formed, Light Gage Steel Construction // ASCE, Journal of the Structural Division. 1959. Vol. 85. № ST9.
167. Winter G. Thin-walled structures – theoretical solutions and test results // Eighth Congress, IABSE. 1968. V. 101. P. 101–112.
168. Winter G. Commentary on the 1968 Edition of the Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. New York: American Iron and Steel Institute, 1970.

Приложение А (обязательное)

Результаты верификационных расчетов

Таблица А.1 – Устойчивость швеллеров в плоскости большей жёсткости

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS				
Rv, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	0.100	0.000	0.435	0.049	0.000	1.131	0.997	1.132	0.0%	0.049	0.997	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	0.200	0.000	0.409	0.091	0.000	1.114	0.997	1.114	0.0%	0.091	0.997	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	0.400	0.000	0.367	0.160	0.000	1.091	0.998	1.091	0.0%	0.160	0.998	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	0.800	0.000	0.306	0.262	0.000	1.067	1.003	1.067	0.0%	0.262	1.003	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	1.600	0.000	0.229	0.383	0.000	1.045	0.998	1.045	0.0%	0.383	0.998	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	3.200	0.000	0.153	0.504	0.000	1.027	0.998	1.027	0.0%	0.504	0.998	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	6.400	0.000	0.093	0.603	0.000	1.015	1.000	1.015	0.0%	0.603	1.000	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	1	3.9	12.800	0.000	0.052	0.670	0.000	1.008	1.000	1.008	0.0%	0.670	1.000	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	0.100	0.000	0.421	0.073	0.000	1.725	0.997	1.707	-1.1%	0.072	0.996	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	0.200	0.000	0.390	0.123	0.000	1.572	0.997	1.560	-0.8%	0.122	0.996	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	0.400	0.000	0.345	0.196	0.000	1.421	1.000	1.414	-0.5%	0.195	0.998	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	0.800	0.000	0.287	0.295	0.000	1.289	1.006	1.286	-0.2%	0.295	1.005	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	1.600	0.000	0.214	0.406	0.000	1.185	0.997	1.183	-0.1%	0.405	0.996	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	3.200	0.000	0.146	0.517	0.000	1.109	0.998	1.109	0.0%	0.517	0.998	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	6.400	0.000	0.090	0.609	0.000	1.061	1.000	1.061	0.0%	0.608	0.999	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	2	7.8	12.800	0.000	0.051	0.672	0.000	1.033	1.000	1.032	0.0%	0.671	1.000	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	0.100	0.000	0.376	0.145	0.000	3.842	0.998	3.657	-4.8%	0.138	0.988	-0.9%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	0.200	0.000	0.346	0.195	0.000	2.820	1.000	2.727	-3.3%	0.189	0.991	-0.9%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	0.400	0.000	0.305	0.263	0.000	2.155	1.003	2.109	-2.1%	0.258	0.996	-0.7%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	0.800	0.000	0.252	0.347	0.000	1.721	1.001	1.707	-0.8%	0.344	0.997	-0.4%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	1.600	0.000	0.192	0.441	0.000	1.431	0.997	1.425	-0.4%	0.439	0.994	-0.3%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	3.200	0.000	0.134	0.536	0.000	1.248	0.998	1.245	-0.2%	0.535	0.997	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	6.400	0.000	0.085	0.617	0.000	1.137	1.000	1.136	-0.1%	0.616	0.999	-0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3	11.7	12.800	0.000	0.049	0.674	0.000	1.073	1.000	1.073	-0.1%	0.674	1.000	-0.1%	

Продолжение таблицы А.1

Численно-аналитический расчет														Расчет ANSYS					
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	0.100	0.000	0.272	0.000	9.058	1.004	8.022	🟡-11.4%	0.241	0.963	🟢-4.1%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	0.200	0.000	0.304	0.000	5.397	1.006	4.972	🟡-7.9%	0.280	0.974	🟢-3.2%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	0.400	0.000	0.349	0.000	3.481	1.001	3.348	🟢-3.8%	0.336	0.983	🟢-1.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	0.800	0.000	0.409	0.000	2.407	0.997	2.350	🟢-2.4%	0.399	0.984	🟢-1.3%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	1.600	0.000	0.481	0.000	1.797	0.997	1.774	🟢-1.2%	0.475	0.989	🟢-0.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	3.200	0.000	0.558	0.000	1.446	0.999	1.438	🟢-0.5%	0.555	0.995	🟢-0.4%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	6.400	0.000	0.626	0.000	1.244	1.000	1.241	🟢-0.2%	0.625	0.998	🟢-0.2%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	4	15.7	12.800	0.000	0.678	0.000	1.130	1.000	1.128	🟢-0.1%	0.677	0.999	🟢-0.1%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	0.100	0.000	0.387	0.000	17.156	0.997	14.884	🟡-13.2%	0.336	0.929	🟢-6.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	0.200	0.000	0.403	0.000	9.354	0.997	8.366	🟡-10.6%	0.361	0.940	🟢-5.7%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	0.400	0.000	0.430	0.000	5.401	0.997	4.987	🟡-7.7%	0.397	0.953	🟢-4.4%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	0.800	0.000	0.470	0.000	3.364	0.997	3.209	🟢-4.6%	0.448	0.968	🟢-2.9%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	1.600	0.000	0.522	0.000	2.288	0.998	2.234	🟢-2.4%	0.509	0.981	🟢-1.7%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	3.200	0.000	0.581	0.000	1.704	0.999	1.686	🟢-1.1%	0.575	0.991	🟢-0.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	6.400	0.000	0.637	0.000	1.381	1.000	1.374	🟢-0.5%	0.634	0.996	🟢-0.4%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	5	19.6	12.800	0.000	0.682	0.000	1.202	1.000	1.200	🟢-0.2%	0.681	0.998	🟢-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	0.100	0.000	0.083	0.000	1.147	1.015	1.147	🟢0.0%	0.083	1.015	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	0.200	0.000	0.152	0.000	1.127	1.030	1.128	🟢0.0%	0.153	1.030	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	0.400	0.000	0.265	0.000	1.101	1.056	1.101	🟢0.0%	0.265	1.057	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	0.800	0.000	0.424	0.000	1.074	1.091	1.074	🟢0.0%	0.424	1.092	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	1.600	0.000	0.574	0.000	1.049	1.063	1.049	🟢0.0%	0.574	1.064	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	3.200	0.000	0.703	0.000	1.029	1.040	1.029	🟢0.0%	0.703	1.040	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	6.400	0.000	0.794	0.000	1.017	1.023	1.016	🟢0.0%	0.794	1.023	🟢0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1	2.9	12.800	0.000	0.851	0.000	1.009	1.012	1.009	🟢0.0%	0.851	1.012	🟢0.0%

Продолжение таблицы А.1

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS					
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	0.100	0.000	0.694	0.127	0.000	1.828	1.024	1.822	✓-0.3%	0.126	1.024	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	0.200	0.000	0.638	0.210	0.000	1.645	1.043	1.647	✓0.1%	0.210	1.043	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	0.400	0.000	0.561	0.328	0.000	1.461	1.073	1.460	✓-0.1%	0.327	1.073	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	0.800	0.000	0.447	0.470	0.000	1.315	1.083	1.314	✓0.0%	0.470	1.083	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	1.600	0.000	0.314	0.603	0.000	1.200	1.058	1.199	✓0.0%	0.602	1.058	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	3.200	0.000	0.200	0.716	0.000	1.118	1.037	1.118	✓0.0%	0.716	1.037	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	6.400	0.000	0.117	0.799	0.000	1.066	1.022	1.066	✓0.0%	0.799	1.022	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2	5.8	12.800	0.000	0.064	0.852	0.000	1.035	1.012	1.035	✓0.0%	0.852	1.012	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	0.100	0.000	0.609	0.254	0.000	4.167	1.054	4.096	✓-1.7%	0.249	1.049	✓-0.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	0.200	0.000	0.558	0.332	0.000	2.977	1.074	2.945	✓-1.1%	0.329	1.070	✓-0.4%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	0.400	0.000	0.482	0.434	0.000	2.251	1.089	2.238	✓-0.6%	0.432	1.087	✓-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	0.800	0.000	0.379	0.538	0.000	1.773	1.070	1.768	✓-0.3%	0.536	1.068	✓-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	1.600	0.000	0.274	0.642	0.000	1.464	1.051	1.462	✓-0.2%	0.641	1.050	✓-0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	3.200	0.000	0.181	0.735	0.000	1.268	1.034	1.267	✓-0.1%	0.735	1.033	✓-0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	6.400	0.000	0.110	0.807	0.000	1.148	1.020	1.147	✓-0.1%	0.806	1.020	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	3	8.7	12.800	0.000	0.062	0.855	0.000	1.079	1.011	1.078	✓-0.1%	0.854	1.011	✓0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	0.100	0.000	0.469	0.447	0.000	9.531	1.087	9.026	🟡-5.3%	0.424	1.061	🟡-2.4%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	0.200	0.000	0.430	0.487	0.000	5.668	1.080	5.483	✓-3.3%	0.471	1.062	✓-1.6%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	0.400	0.000	0.374	0.542	0.000	3.623	1.069	3.561	✓-1.7%	0.533	1.059	✓-0.9%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	0.800	0.000	0.306	0.611	0.000	2.497	1.057	2.474	✓-0.9%	0.605	1.051	✓-0.6%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	1.600	0.000	0.231	0.686	0.000	1.854	1.043	1.846	✓-0.4%	0.683	1.040	✓-0.3%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	3.200	0.000	0.160	0.757	0.000	1.480	1.030	1.477	✓-0.2%	0.755	1.028	✓-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	6.400	0.000	0.101	0.816	0.000	1.262	1.019	1.261	✓-0.1%	0.815	1.017	✓-0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	4	11.5	12.800	0.000	0.059	0.858	0.000	1.140	1.011	1.138	✓-0.1%	0.857	1.010	✓-0.1%

Окончание таблицы А.1

Численно-аналитический расчет														Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	0.100	0.000	0.330	0.587	0.000	17.770	1.061	15.916	-10.4%	0.525	0.994	-6.3%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	0.200	0.000	0.311	0.605	0.000	9.718	1.058	9.085	-6.5%	0.566	1.015	-4.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	0.400	0.000	0.282	0.635	0.000	5.627	1.052	5.431	-3.5%	0.613	1.028	-2.3%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	0.800	0.000	0.241	0.676	0.000	3.507	1.045	3.443	-1.8%	0.663	1.031	-1.3%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	1.600	0.000	0.191	0.726	0.000	2.376	1.035	2.355	-0.9%	0.719	1.028	-0.7%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	3.200	0.000	0.139	0.778	0.000	1.755	1.026	1.747	-0.4%	0.775	1.022	-0.4%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	6.400	0.000	0.092	0.825	0.000	1.409	1.017	1.405	-0.2%	0.823	1.015	-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5	14.4	12.800	0.000	0.055	0.861	0.000	1.217	1.010	1.215	-0.2%	0.860	1.009	-0.2%

Таблица А.2 – Устойчивость швеллеров в плоскости меньшей жёсткости

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS					
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	Ku	ΔKd	My	Ku	ΔKu	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	0.100	0.288	0.000	0.046	1.583	0.702	4.1%	0.048	0.705	0.5%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	0.200	0.275	0.000	0.072	1.306	0.720	2.5%	0.074	0.724	0.5%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	0.400	0.251	0.000	0.117	1.166	0.753	1.4%	0.119	0.756	0.4%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	0.800	0.213	0.000	0.186	1.093	0.801	0.6%	0.187	0.803	0.3%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	1.600	0.164	0.000	0.276	1.053	0.860	0.3%	0.276	0.862	0.2%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	3.200	0.111	0.000	0.367	1.030	0.918	0.1%	0.367	0.919	0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	6.400	0.068	0.000	0.441	1.016	0.961	0.1%	0.441	0.961	0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	3.9	1.0	0.000	12.800	0.038	0.000	0.490	1.008	0.988	0.0%	0.490	0.988	0.0%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	0.100	0.264	0.000	0.092	3.503	0.735	5.8%	0.098	0.745	1.3%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	0.200	0.251	0.000	0.116	2.304	0.752	4.3%	0.121	0.761	1.2%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	0.400	0.230	0.000	0.156	1.698	0.780	3.0%	0.161	0.789	1.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	0.800	0.196	0.000	0.217	1.384	0.822	1.3%	0.220	0.827	0.7%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	1.600	0.152	0.000	0.296	1.215	0.873	0.8%	0.298	0.878	0.5%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	3.200	0.105	0.000	0.377	1.119	0.924	0.5%	0.379	0.927	0.3%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	6.400	0.065	0.000	0.445	1.064	0.963	0.2%	0.446	0.965	0.2%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	7.8	2.0	0.000	12.800	0.037	0.000	0.491	1.034	0.989	0.1%	0.492	0.990	0.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	0.100	0.226	0.000	0.163	7.203	0.785	6.2%	0.173	0.803	2.4%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	0.200	0.216	0.000	0.181	4.198	0.798	5.2%	0.191	0.815	2.2%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	0.400	0.199	0.000	0.213	2.682	0.819	4.3%	0.222	0.836	2.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	0.800	0.172	0.000	0.261	1.905	0.851	2.3%	0.268	0.863	1.3%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	1.600	0.136	0.000	0.325	1.495	0.892	1.7%	0.330	0.902	1.1%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	3.200	0.097	0.000	0.392	1.270	0.933	1.1%	0.397	0.941	0.8%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	6.400	0.062	0.000	0.451	1.145	0.967	0.6%	0.454	0.972	0.5%	
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	11.7	3.0	0.000	12.800	0.036	0.000	0.493	1.076	0.990	0.3%	0.495	0.993	0.3%	

Продолжение таблицы А.2

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	Ku	ΔKd	My	Ku	ΔKu
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	0.100	0.183	0.000	0.241	13.148	0.838	3.1%	0.248	0.851	1.6%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	0.200	0.176	0.000	0.253	7.196	0.846	3.0%	0.261	0.860	1.7%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	0.400	0.164	0.000	0.275	4.205	0.860	2.9%	0.284	0.875	1.7%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	0.800	0.144	0.000	0.310	2.688	0.882	1.9%	0.316	0.893	1.2%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	1.600	0.117	0.000	0.357	1.902	0.912	1.8%	0.363	0.923	1.3%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	3.200	0.086	0.000	0.410	1.485	0.943	1.5%	0.416	0.955	1.2%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	6.400	0.057	0.000	0.459	1.258	0.971	1.0%	0.463	0.980	0.9%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	15.7	4.0	0.000	12.800	0.034	0.000	0.496	1.135	0.992	0.6%	0.499	0.997	0.6%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	0.100	0.144	0.000	0.310	21.532	0.883	-2.8%	0.301	0.866	-1.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	0.200	0.140	0.000	0.318	11.394	0.887	-1.5%	0.313	0.879	-1.0%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	0.400	0.132	0.000	0.332	6.312	0.896	-0.5%	0.330	0.893	-0.4%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	0.800	0.118	0.000	0.355	3.750	0.910	-0.4%	0.353	0.908	-0.3%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	1.600	0.099	0.000	0.388	2.444	0.930	1.1%	0.392	0.938	0.8%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	3.200	0.076	0.000	0.428	1.765	0.953	1.4%	0.433	0.964	1.1%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	6.400	0.052	0.000	0.467	1.404	0.976	1.2%	0.472	0.986	1.0%
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	19.6	5.0	0.000	12.800	0.032	0.000	0.499	1.211	0.993	0.8%	0.503	1.000	0.7%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	0.100	0.633	0.000	0.083	1.310	0.901	2.0%	0.085	0.903	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	0.200	0.592	0.000	0.141	1.188	0.915	1.1%	0.142	0.917	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	0.400	0.525	0.000	0.235	1.121	0.936	0.4%	0.236	0.937	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	0.800	0.427	0.000	0.368	1.080	0.961	0.3%	0.370	0.963	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	1.600	0.310	0.000	0.520	1.051	0.984	0.1%	0.521	0.985	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	3.200	0.199	0.000	0.657	1.030	0.998	0.0%	0.657	0.998	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	6.400	0.116	0.000	0.756	1.017	1.003	0.0%	0.756	1.004	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	2.9	1.0	0.000	12.800	0.063	0.000	0.817	1.009	1.006	0.0%	0.817	1.006	0.0%

Продолжение таблицы А.2

Численно-аналитический расчет														Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	ΔKd	My	Ku	ΔKu
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	0.100	0.589	0.000	0.146	2.472	3.0%	0.150	0.921	0.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	0.200	0.547	0.000	0.204	1.868	1.9%	0.208	0.934	0.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	0.400	0.481	0.000	0.296	1.537	0.3%	0.296	0.949	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	0.800	0.390	0.000	0.417	1.338	0.4%	0.419	0.971	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	1.600	0.285	0.000	0.551	1.208	0.2%	0.553	0.989	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	3.200	0.187	0.000	0.672	1.121	0.1%	0.672	0.999	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	6.400	0.111	0.000	0.761	1.067	0.0%	0.762	1.004	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	5.8	2.0	0.000	12.800	0.062	0.000	0.819	1.036	0.0%	0.819	1.006	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	0.100	0.502	0.000	0.266	5.302	2.5%	0.273	0.950	0.8%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	0.200	0.465	0.000	0.317	3.406	1.7%	0.322	0.958	0.6%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	0.400	0.409	0.000	0.392	2.395	-0.3%	0.391	0.964	-0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	0.800	0.335	0.000	0.488	1.824	0.3%	0.490	0.982	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	1.600	0.250	0.000	0.595	1.483	0.3%	0.596	0.994	0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	3.200	0.170	0.000	0.692	1.275	0.2%	0.694	1.001	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	6.400	0.104	0.000	0.770	1.151	0.1%	0.770	1.005	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	8.7	3.0	0.000	12.800	0.059	0.000	0.822	1.080	0.0%	0.822	1.006	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	0.100	0.387	0.000	0.421	10.864	-1.1%	0.416	0.965	-0.6%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	0.200	0.363	0.000	0.452	6.228	-0.3%	0.451	0.973	-0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	0.400	0.325	0.000	0.500	3.846	-1.7%	0.492	0.972	-1.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	0.800	0.274	0.000	0.566	2.584	-0.1%	0.565	0.989	-0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	1.600	0.212	0.000	0.641	1.888	0.0%	0.642	0.997	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	3.200	0.150	0.000	0.716	1.493	0.1%	0.717	1.003	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	6.400	0.096	0.000	0.779	1.268	0.1%	0.780	1.005	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	11.5	4.0	0.000	12.800	0.056	0.000	0.825	1.142	0.1%	0.826	1.006	0.1%

Окончание таблицы А.2

Численно-аналитический расчет														Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	ΔKd	M _y	Ku	ΔKu
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.285	0.000	0.551	19.300	0.988	18.086	0.949	-4.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.272	0.000	0.567	10.417	0.990	10.013	0.965	-2.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.251	0.000	0.595	5.933	0.992	5.711	0.967	-2.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.218	0.000	0.634	3.634	0.996	3.587	0.987	-0.9%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.176	0.000	0.685	2.426	1.000	2.414	0.996	-0.4%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.130	0.000	0.739	1.776	1.003	1.776	1.003	0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.087	0.000	0.790	1.418	1.005	1.419	1.005	0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	14.4	5.0	0.000	0.000	0.053	0.000	0.829	1.221	1.006	1.222	1.007	0.1%

Таблица А.3 – Устойчивость швеллеров по изгибно-крутильной форме

Численно-аналитический расчет																								Расчет ANSYS					
Ry, МПа	d/t	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu							
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	0.100	0.050	0.300	0.030	0.030	0.74	1.00	2.00	1.004	2.112	0.0%	5.5%	0.030	0.032	0.740	0.4%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	0.200	0.050	0.300	0.060	0.028	0.77	1.00	1.88	1.004	1.984	0.0%	5.3%	0.060	0.030	0.777	0.4%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	0.400	0.050	0.299	0.120	0.025	0.85	1.00	1.65	1.004	1.728	0.0%	4.5%	0.120	0.026	0.847	0.2%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	0.800	0.050	0.287	0.230	0.018	0.95	1.00	1.28	1.004	1.313	0.0%	2.4%	0.230	0.019	0.954	0.1%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	1.600	0.050	0.230	0.368	0.012	1.00	1.00	1.06	1.003	1.066	0.0%	0.4%	0.368	0.012	1.003	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	3.200	0.050	0.154	0.494	0.008	1.00	1.00	1.04	1.002	1.044	0.0%	0.2%	0.494	0.008	1.001	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	6.400	0.050	0.093	0.597	0.005	1.00	1.00	1.04	1.001	1.025	0.0%	-1.7%	0.597	0.005	1.002	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.255	1.0	12.800	0.050	0.052	0.667	0.003	1.00	1.00	1.05	1.001	1.015	0.0%	-3.4%	0.667	0.003	1.001	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	0.100	0.095	0.275	0.028	0.061	0.74	1.01	2.34	1.008	2.394	0.0%	2.2%	0.028	0.063	0.742	0.3%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	0.200	0.095	0.275	0.055	0.058	0.77	1.01	2.23	1.008	2.280	0.0%	2.1%	0.055	0.060	0.773	0.3%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	0.400	0.095	0.277	0.112	0.052	0.84	1.01	1.97	1.008	2.010	0.0%	1.9%	0.112	0.053	0.839	0.2%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	0.800	0.095	0.273	0.220	0.039	0.95	1.01	1.50	1.008	1.523	0.0%	1.9%	0.220	0.039	0.949	0.1%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	1.600	0.095	0.225	0.362	0.024	1.01	1.01	1.15	1.006	1.156	0.0%	0.8%	0.362	0.025	1.008	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	3.200	0.095	0.152	0.489	0.016	1.00	1.00	1.10	1.004	1.101	0.0%	0.5%	0.489	0.016	1.004	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	6.400	0.095	0.093	0.594	0.009	1.00	1.00	1.06	1.002	1.057	0.0%	0.0%	0.594	0.009	1.004	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.383	1.5	12.800	0.095	0.052	0.664	0.005	1.00	1.00	1.06	1.001	1.032	0.0%	-2.9%	0.664	0.005	1.002	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	0.100	0.140	0.255	0.026	0.098	0.76	1.01	2.74	1.013	2.766	0.0%	1.1%	0.026	0.099	0.764	0.3%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	0.200	0.140	0.252	0.051	0.094	0.78	1.01	2.66	1.012	2.689	0.0%	1.1%	0.051	0.095	0.783	0.2%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	0.400	0.140	0.250	0.101	0.086	0.83	1.01	2.44	1.012	2.456	0.0%	0.6%	0.101	0.086	0.830	0.1%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	0.800	0.140	0.254	0.205	0.066	0.94	1.01	1.86	1.013	1.891	0.0%	1.6%	0.205	0.067	0.940	0.2%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	1.600	0.140	0.219	0.355	0.039	1.01	1.01	1.28	1.011	1.313	0.0%	2.4%	0.355	0.040	1.015	0.2%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	3.200	0.140	0.150	0.483	0.025	1.01	1.01	1.18	1.007	1.201	0.0%	1.7%	0.483	0.025	1.009	0.1%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	6.400	0.140	0.092	0.590	0.014	1.01	1.00	1.11	1.004	1.120	0.0%	1.3%	0.590	0.014	1.006	0.0%					
220	5	4	0.25	0.467	0.753	0.540	0.511	2.0	12.800	0.140	0.052	0.662	0.008	1.00	1.00	1.06	1.002	1.065	0.0%	0.6%	0.662	0.008	1.004	0.0%					

Продолжение таблицы А.3

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS									
Ry, МПа	d/t	λ_w	α_f	r _z	r _x	r _y	λ_x	λ_y	m _x	m _y	N	M _x	M _y	Ku	K _{dx}	K _{dy}	K _{dx}	K _{dy}	ΔK_{dx}	ΔK_{dy}	M _x	M _y	K _u	ΔK_u
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	0.100	0.050	0.650	0.066	0.045	0.95	1.01	1.37	1.014	1.332	0.0%	✓ -2.9%	0.066	0.043	0.951	✓ -0.2%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	0.200	0.050	0.635	0.129	0.040	1.00	1.01	1.26	1.013	1.237	0.0%	✓ -1.6%	0.129	0.039	0.995	✓ -0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	0.400	0.050	0.589	0.238	0.034	1.05	1.01	1.14	1.011	1.137	0.0%	✓ -0.3%	0.238	0.033	1.050	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	0.800	0.050	0.488	0.394	0.027	1.08	1.01	1.11	1.008	1.107	0.0%	✓ -0.3%	0.394	0.027	1.084	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	1.600	0.050	0.342	0.551	0.018	1.06	1.01	1.08	1.006	1.073	0.0%	✓ -0.3%	0.551	0.018	1.059	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	3.200	0.050	0.214	0.688	0.011	1.04	1.00	1.05	1.003	1.045	0.0%	✓ -0.3%	0.688	0.011	1.037	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	6.400	0.050	0.123	0.786	0.006	1.02	1.00	1.03	1.002	1.026	0.0%	✓ -0.1%	0.786	0.006	1.021	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.347	1.0	12.800	0.050	0.066	0.846	0.003	1.01	1.00	1.02	1.001	1.015	0.0%	✓ -0.1%	0.846	0.003	1.011	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	0.100	0.095	0.605	0.062	0.096	0.95	1.03	1.66	1.026	1.683	0.0%	✓ 1.1%	0.062	0.097	0.949	✓ 0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	0.200	0.095	0.597	0.122	0.086	0.99	1.03	1.51	1.026	1.526	0.0%	✓ 0.9%	0.122	0.086	0.993	✓ 0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	0.400	0.095	0.561	0.230	0.071	1.05	1.02	1.34	1.023	1.348	0.0%	✓ 0.5%	0.230	0.072	1.048	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	0.800	0.095	0.467	0.380	0.056	1.07	1.02	1.26	1.018	1.267	0.0%	✓ 0.5%	0.380	0.056	1.074	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	1.600	0.095	0.332	0.538	0.037	1.05	1.01	1.18	1.012	1.179	0.0%	✓ 0.2%	0.538	0.037	1.053	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	3.200	0.095	0.210	0.678	0.022	1.03	1.01	1.11	1.008	1.108	0.0%	✓ -0.1%	0.678	0.022	1.034	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	6.400	0.095	0.121	0.780	0.012	1.02	1.00	1.06	1.004	1.060	0.0%	✓ -0.2%	0.780	0.012	1.019	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.520	1.5	12.800	0.095	0.066	0.842	0.006	1.01	1.00	1.03	1.002	1.031	0.0%	✓ -0.3%	0.842	0.006	1.010	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	0.100	0.140	0.563	0.059	0.157	0.96	1.04	1.99	1.043	2.064	0.0%	✓ 3.6%	0.059	0.163	0.966	✓ 0.7%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	0.200	0.140	0.551	0.115	0.145	0.99	1.04	1.88	1.040	1.938	0.0%	✓ 3.3%	0.115	0.149	0.997	✓ 0.5%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	0.400	0.140	0.523	0.217	0.123	1.04	1.04	1.68	1.037	1.719	0.0%	✓ 2.2%	0.217	0.126	1.046	✓ 0.3%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	0.800	0.140	0.439	0.362	0.093	1.06	1.03	1.51	1.030	1.534	0.0%	✓ 1.3%	0.362	0.094	1.062	✓ 0.1%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	1.600	0.140	0.320	0.522	0.060	1.05	1.02	1.35	1.021	1.352	0.0%	✓ 0.3%	0.522	0.060	1.046	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	3.200	0.140	0.206	0.667	0.035	1.03	1.01	1.21	1.013	1.210	0.0%	✓ 0.0%	0.667	0.035	1.030	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	6.400	0.140	0.120	0.773	0.019	1.02	1.01	1.12	1.008	1.114	0.0%	✓ -0.4%	0.773	0.019	1.017	✓ 0.0%
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	0.693	2.0	12.800	0.140	0.065	0.839	0.010	1.01	1.00	1.06	1.004	1.058	0.0%	✓ -0.6%	0.839	0.010	1.009	✓ 0.0%

Окончание таблицы А.3

Численно-аналитический расчет																								Расчет ANSYS						
Ry, МПа	λw	αf	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu									
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	0.100	0.230	0.456	0.049	0.311	0.99	1.08	2.96	1.079	2.995	0.00%	1.1%	0.049	0.314	0.990	0.4%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	0.200	0.230	0.453	0.098	0.293	1.02	1.08	2.81	1.076	2.817	0.00%	0.4%	0.098	0.294	1.017	0.1%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	0.400	0.230	0.438	0.187	0.258	1.05	1.07	2.56	1.070	2.539	0.00%	-1.0%	0.187	0.256	1.052	-0.3%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	0.800	0.230	0.370	0.312	0.203	1.04	1.06	2.39	1.056	2.290	0.00%	-4.2%	0.312	0.195	1.033	-0.9%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	1.600	0.230	0.280	0.466	0.139	1.02	1.04	2.16	1.041	1.991	0.00%	-7.8%	0.466	0.128	1.011	-1.2%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	3.200	0.230	0.191	0.629	0.077	1.02	1.03	1.76	1.028	1.598	0.00%	-9.1%	0.629	0.070	1.010	-0.8%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	6.400	0.230	0.116	0.753	0.038	1.01	1.02	1.43	1.017	1.324	0.00%	-7.6%	0.753	0.035	1.009	-0.3%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.040	3.0	12.800	0.230	0.064	0.829	0.018	1.01	1.01	1.23	1.009	1.170	0.00%	-5.0%	0.829	0.017	1.006	-0.1%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	0.100	0.320	0.342	0.038	0.467	1.01	1.10	4.27	1.108	4.213	-0.3%	-1.4%	0.038	0.461	0.998	-0.7%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	0.200	0.320	0.343	0.076	0.450	1.03	1.10	4.10	1.106	3.993	-0.2%	-2.6%	0.076	0.438	1.016	-1.3%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	0.400	0.320	0.337	0.148	0.415	1.06	1.10	3.85	1.100	3.556	0.00%	-7.7%	0.148	0.383	1.025	-3.4%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	0.800	0.320	0.291	0.252	0.352	1.05	1.08	3.77	1.081	3.091	-0.1%	-18.1%	0.252	0.288	0.973	-6.9%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	1.600	0.320	0.227	0.386	0.278	1.02	1.06	3.82	1.061	2.615	0.00%	-31.5%	0.386	0.190	0.926	-9.6%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	3.200	0.320	0.157	0.523	0.205	1.00	1.04	4.07	1.041	2.248	0.00%	-44.8%	0.524	0.113	0.900	-10.3%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	6.400	0.320	0.098	0.641	0.145	0.99	1.02	4.63	1.025	1.976	0.00%	-57.3%	0.641	0.062	0.894	-9.5%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.386	4.0	12.800	0.320	0.057	0.734	0.102	0.99	1.01	5.63	1.014	1.663	0.00%	-70.5%	0.734	0.030	0.907	-8.2%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	0.100	0.410	0.252	0.028	0.583	1.01	1.12	5.64	1.133	5.447	-1.0%	-3.4%	0.029	0.563	0.990	-2.2%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	0.200	0.410	0.253	0.057	0.571	1.03	1.12	5.50	1.131	5.197	-0.9%	-5.6%	0.057	0.539	0.995	-3.4%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	0.400	0.410	0.248	0.111	0.543	1.05	1.12	5.34	1.123	4.643	-0.6%	-13.1%	0.111	0.472	0.972	-7.6%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	0.800	0.410	0.220	0.193	0.492	1.05	1.10	5.46	1.100	3.823	-0.2%	-30.0%	0.193	0.344	0.881	-15.9%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	1.600	0.410	0.172	0.296	0.432	1.03	1.07	6.12	1.073	3.025	0.00%	-50.6%	0.296	0.214	0.785	-23.9%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	3.200	0.410	0.119	0.399	0.380	1.02	1.05	7.79	1.049	2.419	0.00%	-69.0%	0.399	0.118	0.720	-29.2%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	6.400	0.410	0.073	0.479	0.344	1.00	1.03	11.53	1.029	2.035	0.00%	-82.3%	0.479	0.061	0.684	-31.9%						
220	5	2	0.3	0.783	0.917	0.884	1.733	5.0	12.800	0.410	0.041	0.530	0.323	1.00	1.02	19.31	1.016	1.816	0.00%	-90.6%	0.530	0.030	0.665	-33.2%						

Таблица А.4 – Устойчивость С-профилей в плоскости большей жесткости

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	0.100	0.000	0.344	0.043	0.000	1.241	0.998	0.5%	0.043	0.998	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	0.200	0.000	0.322	0.076	0.000	1.174	0.999	0.4%	0.076	0.999	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	0.400	0.000	0.288	0.128	0.000	1.110	0.999	0.2%	0.128	1.000	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	0.800	0.000	0.238	0.204	0.000	1.070	1.001	0.1%	0.204	1.001	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	1.600	0.000	0.183	0.306	0.000	1.043	1.036	0.1%	0.306	1.037	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	3.200	0.000	0.120	0.394	0.000	1.025	1.023	0.0%	0.394	1.023	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	6.400	0.000	0.071	0.462	0.000	1.014	1.014	0.0%	0.462	1.015	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1	1.913	12.800	0.000	0.039	0.507	0.000	1.007	1.008	0.0%	0.507	1.008	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	0.100	0.000	0.322	0.076	0.000	2.373	0.999	2.8%	0.079	1.003	0.4%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	0.200	0.000	0.301	0.108	0.000	1.798	0.999	2.5%	0.111	1.004	0.5%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	0.400	0.000	0.268	0.159	0.000	1.482	1.000	1.2%	0.160	1.003	0.3%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	0.800	0.000	0.221	0.229	0.000	1.293	1.001	0.6%	0.230	1.004	0.3%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	1.600	0.000	0.171	0.322	0.000	1.176	1.033	0.5%	0.324	1.036	0.3%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	3.200	0.000	0.114	0.402	0.000	1.101	1.022	0.3%	0.403	1.024	0.2%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	6.400	0.000	0.069	0.466	0.000	1.055	1.014	0.1%	0.466	1.015	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2	3.827	12.800	0.000	0.039	0.508	0.000	1.029	1.008	0.0%	0.508	1.009	0.0%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	0.100	0.000	0.281	0.138	0.000	4.932	0.999	-1.7%	0.136	0.995	-0.4%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	0.200	0.000	0.263	0.166	0.000	3.162	1.000	-0.9%	0.165	0.997	-0.3%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	0.400	0.000	0.235	0.209	0.000	2.225	1.001	-0.7%	0.207	0.998	-0.3%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	0.800	0.000	0.204	0.278	0.000	1.702	1.042	0.1%	0.278	1.043	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	1.600	0.000	0.154	0.346	0.000	1.407	1.029	0.2%	0.347	1.031	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	3.200	0.000	0.105	0.414	0.000	1.229	1.021	0.2%	0.415	1.022	0.2%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	6.400	0.000	0.065	0.471	0.000	1.125	1.013	0.2%	0.471	1.015	0.1%	
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	3	5.740	12.800	0.000	0.037	0.510	0.000	1.066	1.008	0.1%	0.510	1.009	0.1%	

Продолжение таблицы А.4

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	0.100	0.000	0.227	0.220	0.000	9.660	1.001	8.936	🟡 -7.5%	0.203	0.972	🟢 -2.9%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	0.200	0.000	0.215	0.238	0.000	5.534	1.001	5.241	🟡 -5.3%	0.226	0.979	🟢 -2.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	0.400	0.000	0.203	0.279	0.000	3.430	1.042	3.340	🟢 -2.6%	0.272	1.029	🟢 -1.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	0.800	0.000	0.172	0.322	0.000	2.345	1.033	2.312	🟢 -1.4%	0.317	1.025	🟢 -0.8%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	1.600	0.000	0.134	0.374	0.000	1.747	1.026	1.738	🟢 -0.5%	0.372	1.022	🟢 -0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	3.200	0.000	0.095	0.429	0.000	1.411	1.019	1.410	🟢 0.0%	0.429	1.018	🟢 0.0%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	6.400	0.000	0.061	0.477	0.000	1.222	1.013	1.223	🟢 0.1%	0.477	1.014	🟢 0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	4	7.653	12.800	0.000	0.036	0.512	0.000	1.117	1.008	1.118	🟢 0.1%	0.512	1.009	🟢 0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	0.100	0.000	0.183	0.306	0.000	16.654	1.036	14.576	🟡 -12.5%	0.267	0.968	🟡 -6.6%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	0.200	0.000	0.175	0.317	0.000	9.041	1.034	8.183	🟡 -9.5%	0.287	0.980	🟡 -5.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	0.400	0.000	0.161	0.336	0.000	5.197	1.031	4.844	🟡 -6.8%	0.313	0.990	🟢 -3.9%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	0.800	0.000	0.141	0.364	0.000	3.230	1.027	3.105	🟢 -3.9%	0.350	1.002	🟢 -2.4%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	1.600	0.000	0.114	0.402	0.000	2.200	1.022	2.163	🟢 -1.7%	0.395	1.010	🟢 -1.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	3.200	0.000	0.084	0.444	0.000	1.648	1.017	1.641	🟢 -0.4%	0.442	1.014	🟢 -0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	6.400	0.000	0.056	0.484	0.000	1.346	1.012	1.347	🟢 0.1%	0.484	1.012	🟢 0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	5	9.566	12.800	0.000	0.034	0.514	0.000	1.182	1.007	1.183	🟢 0.1%	0.515	1.008	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	0.100	0.000	0.662	0.077	0.000	1.162	1.002	1.170	🟢 0.7%	0.077	1.002	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	0.200	0.000	0.619	0.139	0.000	1.121	1.005	1.126	🟢 0.5%	0.139	1.006	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	0.400	0.000	0.548	0.239	0.000	1.092	1.011	1.096	🟢 0.3%	0.240	1.012	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	0.800	0.000	0.448	0.383	0.000	1.068	1.020	1.070	🟢 0.2%	0.384	1.021	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	1.600	0.000	0.336	0.563	0.000	1.047	1.052	1.048	🟢 0.1%	0.564	1.053	🟢 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	3.200	0.000	0.222	0.733	0.000	1.029	1.069	1.030	🟢 0.0%	0.733	1.070	🟢 0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	6.400	0.000	0.128	0.834	0.000	1.017	1.043	1.017	🟢 0.0%	0.834	1.043	🟢 0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1	1.813	12.800	0.000	0.069	0.894	0.000	1.009	1.023	1.009	🟢 0.0%	0.894	1.023	🟢 0.0%

Продолжение таблицы А.4

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mх	mу	N	Mx	My	Kdx	Ku	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	0.100	0.000	0.635	0.115	0.000	1.813	1.004	3.0%	0.119	1.007	0.4%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	0.200	0.000	0.586	0.185	0.000	1.582	1.008	2.0%	0.189	1.012	0.4%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	0.400	0.000	0.512	0.291	0.000	1.420	1.014	1.3%	0.295	1.018	0.4%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	0.800	0.000	0.415	0.430	0.000	1.294	1.024	0.7%	0.433	1.027	0.3%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	1.600	0.000	0.313	0.598	0.000	1.195	1.055	0.4%	0.600	1.058	0.2%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	3.200	0.000	0.210	0.751	0.000	1.119	1.070	0.2%	0.752	1.072	0.1%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	6.400	0.000	0.123	0.839	0.000	1.067	1.041	0.1%	0.840	1.042	0.1%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2	3.626	12.800	0.000	0.068	0.895	0.000	1.036	1.023	0.0%	0.896	1.023	0.0%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	0.100	0.000	0.567	0.213	0.000	3.749	1.009	3.0%	0.219	1.016	0.7%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	0.200	0.000	0.516	0.285	0.000	2.759	1.014	2.0%	0.291	1.020	0.6%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	0.400	0.000	0.448	0.383	0.000	2.142	1.020	1.2%	0.388	1.025	0.5%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	0.800	0.000	0.370	0.514	0.000	1.736	1.049	0.9%	0.519	1.054	0.5%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	1.600	0.000	0.278	0.649	0.000	1.458	1.060	0.5%	0.652	1.064	0.3%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	3.200	0.000	0.190	0.771	0.000	1.270	1.064	0.3%	0.773	1.066	0.2%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	6.400	0.000	0.115	0.847	0.000	1.150	1.039	0.1%	0.848	1.040	0.1%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	3	5.439	12.800	0.000	0.065	0.898	0.000	1.080	1.022	0.0%	0.898	1.022	0.0%	

Окончание таблицы А.4

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	$\bar{M}x$	$\bar{M}y$	Kdx	Ku	ΔKd	$\bar{M}x$	Ku	ΔKu		
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	0.100	0.000	0.447	0.385	0.000	8.617	1.020	8.785	1.9%	0.392	1.028	0.8%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	0.200	0.000	0.412	0.434	0.000	5.271	1.024	5.342	1.3%	0.440	1.030	0.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	0.400	0.000	0.370	0.515	0.000	3.478	1.049	3.532	1.6%	0.523	1.057	0.8%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	0.800	0.000	0.308	0.605	0.000	2.457	1.056	2.481	1.0%	0.611	1.062	0.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	1.600	0.000	0.239	0.708	0.000	1.851	1.067	1.863	0.7%	0.712	1.071	0.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	3.200	0.000	0.167	0.794	0.000	1.483	1.056	1.489	0.4%	0.797	1.059	0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	6.400	0.000	0.106	0.857	0.000	1.265	1.036	1.268	0.2%	0.858	1.037	0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	4	7.252	12.800	0.000	0.062	0.901	0.000	1.141	1.021	1.142	0.0%	0.902	1.021	0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	0.100	0.000	0.333	0.567	0.000	17.021	1.052	17.157	0.8%	0.572	1.057	0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	0.200	0.000	0.316	0.594	0.000	9.409	1.055	10.129	7.7%	0.639	1.102	4.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	0.400	0.000	0.288	0.635	0.000	5.518	1.059	5.603	1.5%	0.645	1.069	1.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	0.800	0.000	0.249	0.693	0.000	3.482	1.065	3.525	1.2%	0.702	1.074	0.8%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	1.600	0.000	0.200	0.761	0.000	2.380	1.067	2.401	0.9%	0.768	1.074	0.7%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	3.200	0.000	0.145	0.817	0.000	1.760	1.049	1.769	0.5%	0.821	1.053	0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	6.400	0.000	0.096	0.867	0.000	1.413	1.032	1.416	0.2%	0.869	1.034	0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	5	9.065	12.800	0.000	0.058	0.905	0.000	1.220	1.019	1.220	0.0%	0.905	1.020	0.0%

Таблица А.5 – Устойчивость С-профилей в плоскости меньшей жесткости

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	Ku	Kdy	ΔKd	My	Ku	ΔKu
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	0.100	0.298	0.000	0.043	1.457	0.871	1.509	3.6%	0.045	0.873	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	0.200	0.283	0.000	0.071	1.250	0.878	1.276	2.1%	0.072	0.881	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	0.400	0.259	0.000	0.118	1.142	0.892	1.156	1.2%	0.120	0.895	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	0.800	0.221	0.000	0.191	1.082	0.914	1.089	0.7%	0.193	0.916	0.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	1.600	0.171	0.000	0.287	1.047	0.939	1.051	0.4%	0.288	0.941	0.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	3.200	0.118	0.000	0.387	1.027	0.962	1.029	0.2%	0.387	0.963	0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	6.400	0.072	0.000	0.469	1.015	0.979	1.016	0.1%	0.470	0.980	0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.000	12.800	0.041	0.000	0.526	1.008	0.989	1.008	0.0%	0.526	0.989	0.0%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	0.100	0.276	0.000	0.084	3.043	0.882	3.140	3.2%	0.087	0.887	0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	0.200	0.263	0.000	0.110	2.097	0.890	2.149	2.5%	0.113	0.894	0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	0.400	0.241	0.000	0.154	1.603	0.903	1.628	1.6%	0.157	0.907	0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	0.800	0.206	0.000	0.221	1.338	0.922	1.352	1.0%	0.223	0.926	0.4%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	1.600	0.161	0.000	0.307	1.193	0.944	1.199	0.5%	0.308	0.946	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	3.200	0.112	0.000	0.397	1.109	0.964	1.112	0.2%	0.398	0.966	0.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	6.400	0.070	0.000	0.474	1.060	0.980	1.061	0.1%	0.474	0.980	0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.000	12.800	0.040	0.000	0.527	1.032	0.989	1.032	0.0%	0.527	0.990	0.0%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	0.100	0.242	0.000	0.152	6.266	0.903	6.283	0.3%	0.152	0.903	0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	0.200	0.231	0.000	0.173	3.739	0.909	3.755	0.4%	0.173	0.910	0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	0.400	0.212	0.000	0.209	2.461	0.919	2.479	0.7%	0.210	0.921	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	0.800	0.183	0.000	0.264	1.800	0.933	1.818	1.0%	0.266	0.937	0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	1.600	0.145	0.000	0.336	1.446	0.951	1.458	0.8%	0.338	0.955	0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	3.200	0.103	0.000	0.413	1.248	0.968	1.256	0.6%	0.415	0.972	0.4%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	6.400	0.066	0.000	0.480	1.135	0.981	1.140	0.4%	0.482	0.984	0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.568	3.0	0.000	12.800	0.039	0.000	0.530	1.072	0.990	1.074	0.2%	0.531	0.992	0.2%

Продолжение таблицы А.5

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	m _x	m _y	N	M _x	M _y	K _{dy}	K _u	K _{dy}	ΔK _d	M _y	K _u	ΔK _u
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	0.100	0.201	0.000	0.230	11.461	0.924	11.210	✓ -2.2%	0.225	0.916	✓ -0.9%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	0.200	0.193	0.000	0.246	6.373	0.928	6.279	✓ -1.5%	0.242	0.922	✓ -0.7%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	0.400	0.179	0.000	0.272	3.810	0.935	3.801	✓ -0.2%	0.272	0.934	✓ -0.1%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	0.800	0.157	0.000	0.314	2.502	0.946	2.525	✓ 0.9%	0.317	0.950	✓ 0.5%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	1.600	0.127	0.000	0.369	1.817	0.958	1.842	✓ 1.4%	0.374	0.967	✓ 0.9%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	3.200	0.093	0.000	0.431	1.447	0.972	1.466	✓ 1.3%	0.437	0.981	✓ 1.0%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	6.400	0.062	0.000	0.489	1.241	0.983	1.253	✓ 1.0%	0.493	0.991	✓ 0.8%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.091	4.0	0.000	12.800	0.037	0.000	0.533	1.128	0.990	1.134	✓ 0.6%	0.536	0.996	✓ 0.6%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	0.100	0.161	0.000	0.306	18.980	0.944	17.962	⚠ -5.4%	0.289	0.916	✓ -2.9%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	0.200	0.156	0.000	0.316	10.145	0.946	9.726	✓ -4.1%	0.303	0.924	✓ -2.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	0.400	0.146	0.000	0.334	5.710	0.950	5.579	✓ -2.3%	0.326	0.937	✓ -1.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	0.800	0.131	0.000	0.362	3.467	0.957	3.481	✓ 0.4%	0.364	0.959	✓ 0.3%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	1.600	0.109	0.000	0.403	2.313	0.966	2.353	✓ 1.7%	0.410	0.977	✓ 1.2%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	3.200	0.083	0.000	0.451	1.705	0.975	1.740	✓ 2.0%	0.460	0.991	✓ 1.6%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	6.400	0.056	0.000	0.498	1.377	0.984	1.400	✓ 1.7%	0.506	0.998	✓ 1.4%
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	2.613	5.0	0.000	12.800	0.035	0.000	0.536	1.199	0.991	1.212	✓ 1.1%	0.542	1.000	✓ 1.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	0.100	0.638	0.000	0.076	1.197	0.968	1.210	✓ 1.1%	0.077	0.969	✓ 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	0.200	0.600	0.000	0.136	1.133	0.977	1.145	✓ 1.1%	0.137	0.978	✓ 0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	0.400	0.534	0.000	0.234	1.095	0.989	1.103	✓ 0.7%	0.236	0.991	✓ 0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	0.800	0.438	0.000	0.374	1.068	1.002	1.073	✓ 0.4%	0.376	1.004	✓ 0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	1.600	0.322	0.000	0.538	1.046	1.013	1.048	✓ 0.2%	0.540	1.014	✓ 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	3.200	0.210	0.000	0.690	1.029	1.016	1.030	✓ 0.1%	0.691	1.017	✓ 0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	6.400	0.123	0.000	0.803	1.016	1.014	1.017	✓ 0.0%	0.803	1.014	✓ 0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.000	12.800	0.068	0.000	0.873	1.009	1.010	1.009	✓ 0.0%	0.873	1.010	✓ 0.0%

Продолжение таблицы А.5

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	Ku	Kdy	ΔKd	My	Ku	ΔKu
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	0.100	0.611	0.000	0.119	1.946	0.974	1.963	0.9%	0.120	0.975	0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	0.200	0.568	0.000	0.184	1.619	0.983	1.649	1.8%	0.187	0.986	0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	0.400	0.500	0.000	0.285	1.425	0.994	1.443	1.2%	0.288	0.998	0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	0.800	0.406	0.000	0.420	1.291	1.006	1.301	0.8%	0.423	1.009	0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	1.600	0.299	0.000	0.569	1.190	1.014	1.195	0.4%	0.572	1.016	0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	3.200	0.198	0.000	0.706	1.116	1.016	1.118	0.2%	0.707	1.017	0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	6.400	0.119	0.000	0.809	1.066	1.014	1.066	0.1%	0.809	1.014	0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.000	12.800	0.066	0.000	0.875	1.035	1.010	1.036	0.0%	0.875	1.010	0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	0.100	0.547	0.000	0.215	3.931	0.987	3.928	-0.1%	0.215	0.986	0.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	0.200	0.503	0.000	0.281	2.793	0.994	2.845	1.9%	0.286	0.999	0.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	0.400	0.438	0.000	0.374	2.135	1.002	2.165	1.4%	0.379	1.008	0.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	0.800	0.356	0.000	0.490	1.721	1.010	1.738	1.0%	0.495	1.015	0.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	1.600	0.266	0.000	0.615	1.445	1.015	1.455	0.7%	0.619	1.019	0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	3.200	0.180	0.000	0.729	1.263	1.016	1.268	0.4%	0.732	1.019	0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	6.400	0.111	0.000	0.818	1.148	1.013	1.150	0.2%	0.820	1.015	0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.000	12.800	0.064	0.000	0.878	1.080	1.010	1.081	0.1%	0.879	1.011	0.1%

Окончание таблицы А.5

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	Ku	ΔKd	My	Ku	ΔKu	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	0.100	0.437	0.000	0.375	8.578	1.002	✓ -0.2%	0.374	1.002	✓ -0.1%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	0.200	0.405	0.000	0.422	5.219	1.006	✓ 2.0%	0.431	1.015	✓ 0.9%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	0.400	0.357	0.000	0.489	3.424	1.010	✓ 1.8%	0.498	1.020	✓ 0.9%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	0.800	0.296	0.000	0.573	2.417	1.014	✓ 1.5%	0.582	1.023	✓ 0.9%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	1.600	0.228	0.000	0.666	1.827	1.016	✓ 1.1%	0.673	1.024	✓ 0.8%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	3.200	0.160	0.000	0.755	1.473	1.015	✓ 0.8%	0.761	1.021	✓ 0.6%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	6.400	0.103	0.000	0.829	1.262	1.013	✓ 0.5%	0.833	1.017	✓ 0.4%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.000	12.800	0.060	0.000	0.882	1.141	1.009	✓ 0.2%	0.884	1.012	✓ 0.2%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	0.100	0.324	0.000	0.536	16.548	1.013	✓ 2.7%	0.550	1.028	✓ 1.5%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	0.200	0.306	0.000	0.560	9.158	1.013	✓ 3.5%	0.580	1.034	✓ 2.0%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	0.400	0.278	0.000	0.599	5.386	1.015	✓ 2.8%	0.615	1.032	✓ 1.7%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	0.800	0.239	0.000	0.652	3.413	1.016	✓ 2.1%	0.665	1.030	✓ 1.4%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	1.600	0.191	0.000	0.715	2.345	1.016	✓ 1.7%	0.727	1.028	✓ 1.2%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	3.200	0.140	0.000	0.782	1.748	1.015	✓ 1.1%	0.790	1.024	✓ 0.9%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	6.400	0.093	0.000	0.841	1.409	1.012	✓ 0.7%	0.847	1.018	✓ 0.6%	
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.000	12.800	0.057	0.000	0.886	1.219	1.009	✓ 0.4%	0.890	1.013	✓ 0.3%	

Таблица А.6 – Устойчивость С-профилей по изгибно-крутильной форме

Численно-аналитический расчет																				Расчет ANSYS					
Ry, МПа	$\frac{d}{t}$	λ_w	α_f	α_c	r _z	r _x	γ_y	λ_x	λ_y	m _x	m _y	N	$\bar{M}_x$	$\bar{M}_y$	K _{dx}	K _{dy}	ΔK_{dx}	ΔK_{dy}	$\bar{M}_x$	$\bar{M}_y$	K _u	ΔK_u			
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.100	0.050	0.303	0.031	0.026	1.03	1.75	1.828	0.0%	4.7%	0.03	0.03	0.91	0.2%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.200	0.050	0.317	0.066	0.019	1.04	1.21	1.235	0.0%	1.8%	0.07	0.02	1.00	0.1%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.400	0.050	0.287	0.118	0.016	1.03	1.12	1.132	0.0%	0.9%	0.12	0.02	1.01	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	0.800	0.050	0.239	0.195	0.013	1.02	1.08	1.090	0.0%	0.8%	0.19	0.01	1.01	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	1.600	0.050	0.185	0.299	0.010	1.01	1.06	1.064	0.0%	0.7%	0.30	0.01	1.05	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	3.200	0.050	0.121	0.390	0.006	1.01	1.04	1.044	0.0%	0.7%	0.39	0.01	1.03	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	6.400	0.050	0.072	0.460	0.004	1.00	1.02	1.026	0.0%	0.4%	0.46	0.00	1.02	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.523	1.0	12.800	0.050	0.039	0.506	0.002	1.00	1.01	1.013	0.0%	0.1%	0.51	0.00	1.01	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	0.100	0.095	0.288	0.030	0.054	1.06	1.99	2.091	0.0%	5.2%	0.03	0.06	0.92	0.5%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	0.200	0.095	0.286	0.060	0.050	1.05	1.85	1.931	-0.1%	4.2%	0.06	0.05	0.96	0.4%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	0.400	0.095	0.279	0.118	0.035	1.06	1.30	1.308	0.0%	0.4%	0.12	0.03	1.02	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	0.800	0.095	0.234	0.195	0.026	1.04	1.19	1.186	0.0%	-0.1%	0.19	0.03	1.02	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	1.600	0.095	0.182	0.299	0.020	1.03	1.14	1.132	0.0%	-0.4%	0.30	0.02	1.05	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	3.200	0.095	0.120	0.389	0.012	1.02	1.09	1.083	0.0%	-0.3%	0.39	0.01	1.03	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	6.400	0.095	0.071	0.459	0.007	1.01	1.05	1.048	0.0%	-0.1%	0.46	0.01	1.02	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	0.784	1.5	12.800	0.095	0.039	0.505	0.004	1.00	1.03	1.026	0.0%	-0.1%	0.51	0.00	1.01	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.100	0.140	0.271	0.030	0.088	1.09	2.33	2.418	-0.1%	3.7%	0.03	0.09	0.93	0.6%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.200	0.140	0.270	0.059	0.082	1.09	2.17	2.234	-0.1%	3.0%	0.06	0.08	0.97	0.4%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.400	0.140	0.268	0.118	0.061	1.10	1.61	1.612	-0.2%	0.1%	0.12	0.06	1.03	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	0.800	0.140	0.228	0.195	0.043	1.07	1.36	1.344	-0.1%	-0.9%	0.20	0.04	1.03	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	1.600	0.140	0.174	0.291	0.033	1.04	1.36	1.327	-0.1%	-2.5%	0.29	0.03	1.04	-0.1%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	3.200	0.140	0.118	0.388	0.019	1.03	1.16	1.149	0.0%	-1.2%	0.39	0.02	1.04	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	6.400	0.140	0.071	0.458	0.011	1.01	1.09	1.083	0.0%	-0.8%	0.46	0.01	1.02	0.0%		
330	5	6	0.4	0.3	0.373	0.561	0.598	1.045	2.0	12.800	0.140	0.039	0.505	0.006	1.01	1.05	1.044	0.0%	-0.5%	0.50	0.01	1.01	0.0%		

Продолжение таблицы А.6

Численно-аналитический расчет																									Расчет ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Kdy	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu						
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.100	0.050	0.644	0.067	0.037	1.04	1.16	1.00	1.040	1.183	✓	0.0%	1.8%	0.07	0.04	1.01	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.200	0.050	0.605	0.125	0.035	1.03	1.15	1.01	1.032	1.169	✓	0.0%	1.6%	0.12	0.04	1.01	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.400	0.050	0.540	0.221	0.031	1.03	1.13	1.01	1.025	1.146	✓	0.0%	1.3%	0.22	0.03	1.01	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	0.800	0.050	0.445	0.363	0.025	1.02	1.10	1.02	1.020	1.114	✓	0.0%	0.8%	0.36	0.02	1.02	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	1.600	0.050	0.336	0.545	0.018	1.01	1.08	1.05	1.014	1.086	✓	0.0%	0.6%	0.55	0.02	1.05	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	3.200	0.050	0.223	0.720	0.012	1.01	1.05	1.07	1.009	1.055	✓	0.0%	0.4%	0.72	0.01	1.07	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	6.400	0.050	0.128	0.826	0.007	1.01	1.03	1.04	1.005	1.031	✓	0.0%	0.2%	0.83	0.01	1.04	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.552	1.0	12.800	0.050	0.069	0.890	0.004	1.00	1.02	1.02	1.003	1.016	✓	0.0%	0.1%	0.89	0.00	1.02	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	0.100	0.095	0.616	0.067	0.079	1.08	1.35	1.01	1.082	1.375	✓	-0.2%	2.0%	0.07	0.08	1.01	✓	0.2%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	0.200	0.095	0.579	0.123	0.073	1.07	1.33	1.01	1.067	1.354	✓	-0.1%	1.7%	0.12	0.07	1.01	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	0.400	0.095	0.519	0.219	0.064	1.05	1.30	1.02	1.055	1.320	✓	-0.1%	1.3%	0.22	0.07	1.02	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	0.800	0.095	0.430	0.358	0.051	1.04	1.26	1.02	1.043	1.268	✓	-0.1%	0.7%	0.36	0.05	1.02	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	1.600	0.095	0.327	0.540	0.037	1.03	1.18	1.05	1.031	1.188	✓	0.0%	0.3%	0.54	0.04	1.05	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	3.200	0.095	0.219	0.715	0.023	1.02	1.12	1.07	1.020	1.121	✓	0.0%	0.0%	0.72	0.02	1.07	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	6.400	0.095	0.127	0.821	0.013	1.01	1.07	1.04	1.011	1.066	✓	0.0%	-0.1%	0.82	0.01	1.04	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	0.827	1.5	12.800	0.095	0.069	0.887	0.007	1.01	1.04	1.02	1.006	1.035	✓	0.0%	0.0%	0.89	0.01	1.02	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.100	0.140	0.583	0.066	0.129	1.14	1.58	1.01	1.144	1.601	✓	-0.5%	1.6%	0.07	0.13	1.02	✓	0.2%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.200	0.140	0.550	0.122	0.119	1.11	1.54	1.02	1.118	1.564	✓	-0.3%	1.4%	0.12	0.12	1.02	✓	0.2%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.400	0.140	0.494	0.216	0.103	1.09	1.49	1.02	1.096	1.504	✓	-0.3%	0.9%	0.22	0.10	1.02	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	0.800	0.140	0.412	0.354	0.082	1.07	1.42	1.03	1.075	1.423	✓	-0.2%	0.2%	0.35	0.08	1.03	✓	0.1%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	1.600	0.140	0.317	0.535	0.058	1.05	1.30	1.06	1.054	1.292	✓	-0.1%	-0.3%	0.54	0.06	1.06	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	3.200	0.140	0.214	0.708	0.037	1.03	1.22	1.07	1.034	1.211	✓	0.0%	-1.0%	0.71	0.04	1.07	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	6.400	0.140	0.125	0.816	0.020	1.02	1.13	1.04	1.020	1.119	✓	0.0%	-0.9%	0.82	0.02	1.04	✓	0.0%				
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.103	2.0	12.800	0.140	0.068	0.884	0.010	1.01	1.07	1.02	1.011	1.062	✓	0.0%	-0.5%	0.88	0.01	1.02	✓	0.0%				

Окончание таблицы А.6

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS										
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	rz	rx	γy	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Kdy	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.100	0.230	0.491	0.063	0.265	1.29	2.35	1.03	1.296	2.379	✓ -0.8%	✓ 1.4%	0.06	0.27	1.03	✓ 0.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.200	0.230	0.469	0.116	0.244	1.24	2.26	1.03	1.243	2.278	✓ -0.6%	✓ 0.7%	0.12	0.25	1.03	✓ 0.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.400	0.230	0.429	0.205	0.210	1.20	2.14	1.03	1.201	2.118	✓ -0.5%	✓ -0.8%	0.21	0.21	1.03	✓ -0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	0.800	0.230	0.366	0.338	0.166	1.15	1.97	1.03	1.157	1.905	✓ -0.3%	✓ -3.5%	0.34	0.16	1.03	✓ -0.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	1.600	0.230	0.291	0.518	0.116	1.11	1.74	1.06	1.116	1.619	✓ -0.2%	✓ -6.9%	0.52	0.11	1.06	✓ -0.7%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	3.200	0.230	0.200	0.688	0.072	1.07	1.57	1.07	1.075	1.422	✓ -0.1%	✓ -9.4%	0.69	0.07	1.06	✓ -0.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	6.400	0.230	0.120	0.801	0.039	1.04	1.41	1.04	1.044	1.280	✓ 0.0%	✓ -9.5%	0.80	0.04	1.04	✓ -0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	1.655	3.0	12.800	0.230	0.067	0.876	0.019	1.02	1.24	1.02	1.024	1.154	✓ 0.0%	✓ -7.1%	0.88	0.02	1.02	✓ -0.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.100	0.320	0.379	0.054	0.432	1.42	3.56	1.04	1.433	3.616	✓ -0.7%	✓ 1.6%	0.05	0.44	1.04	✓ 0.7%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.200	0.320	0.367	0.099	0.404	1.35	3.45	1.04	1.358	3.417	✓ -0.5%	✓ -0.8%	0.10	0.40	1.03	✓ -0.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.400	0.320	0.342	0.177	0.362	1.29	3.30	1.04	1.300	3.076	✓ -0.4%	✓ -6.9%	0.18	0.34	1.01	✓ -2.4%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	0.800	0.320	0.299	0.296	0.306	1.23	3.20	1.04	1.238	2.616	✓ -0.3%	✓ -18.1%	0.30	0.25	0.99	✓ -5.5%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	1.600	0.320	0.239	0.450	0.247	1.17	3.23	1.06	1.176	2.127	✓ -0.2%	✓ -34.1%	0.45	0.16	0.97	✓ -8.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	3.200	0.320	0.170	0.607	0.189	1.12	3.47	1.06	1.116	1.682	✓ -0.1%	✓ -51.6%	0.61	0.09	0.96	✓ -9.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	6.400	0.320	0.106	0.722	0.138	1.07	4.08	1.04	1.069	1.435	✓ 0.0%	✓ -64.9%	0.72	0.05	0.95	✓ -9.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.206	4.0	12.800	0.320	0.060	0.796	0.109	1.04	5.68	1.02	1.038	1.291	✓ 0.0%	✓ -77.3%	0.80	0.02	0.93	✓ -8.6%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.100	0.410	0.281	0.043	0.576	1.52	4.99	1.04	1.549	5.064	✓ -1.6%	✓ 1.5%	0.04	0.58	1.05	✓ 1.0%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.200	0.410	0.274	0.078	0.551	1.43	4.91	1.04	1.448	4.708	✓ -1.1%	✓ -4.1%	0.08	0.53	1.02	✓ -2.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.400	0.410	0.257	0.140	0.516	1.36	4.89	1.04	1.368	4.047	✓ -0.7%	✓ -17.3%	0.14	0.43	0.95	✓ -8.9%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	0.800	0.410	0.224	0.230	0.474	1.28	5.16	1.05	1.286	3.186	✓ -0.2%	✓ -38.2%	0.23	0.29	0.86	✓ -18.1%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	1.600	0.410	0.176	0.338	0.439	1.20	6.10	1.05	1.203	2.371	✓ 0.0%	✓ -61.1%	0.34	0.17	0.77	✓ -26.7%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	3.200	0.410	0.120	0.434	0.409	1.13	8.31	1.05	1.129	1.790	✓ 0.0%	✓ -78.5%	0.43	0.09	0.71	✓ -32.2%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	6.400	0.410	0.073	0.501	0.403	1.07	13.51	1.04	1.074	1.407	✓ 0.0%	✓ -89.6%	0.50	0.04	0.66	✓ -36.3%
330	5	3	0.4	0.3	0.719	0.964	0.953	2.758	5.0	12.800	0.410	0.040	0.538	0.399	1.04	24.09	1.03	1.040	1.237	✓ 0.0%	✓ -94.9%	0.54	0.02	0.64	✓ -38.5%

Таблица А.7 – Устойчивость Сигма-профилей в плоскости большей жёсткости

Численно-аналитический расчет																							Расчет ANSYS				
Ry, МПа	d/t	λ_w	α_f	α_c	α_2	α_1	α_k	r _z	r _x	γ_y	λ_x	λ_y	m _x	m _y	N	$\bar{M}_x$	$\bar{M}_y$	K _{dx}	K _u	ΔK_d	$\bar{M}_x$	K _u	ΔK_u				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	0.100	0.000	0.418	0.052	0.000	1.240	1.021	0.1%	0.052	1.021	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	0.200	0.000	0.395	0.094	0.000	1.192	1.040	0.0%	0.094	1.040	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	0.400	0.000	0.358	0.161	0.000	1.125	1.067	0.0%	0.161	1.067	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	0.800	0.000	0.308	0.266	0.000	1.081	1.126	0.0%	0.266	1.126	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	1.600	0.000	0.218	0.366	0.000	1.048	1.091	0.1%	0.366	1.091	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	3.200	0.000	0.138	0.455	0.000	1.028	1.058	0.1%	0.455	1.058	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	6.400	0.000	0.080	0.520	0.000	1.016	1.034	0.1%	0.520	1.034	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1	2.8	12.800	0.000	0.043	0.561	0.000	1.008	1.019	0.1%	0.560	1.019	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	0.100	0.000	0.393	0.099	0.000	2.532	1.042	0.4%	0.099	1.041	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	0.200	0.000	0.369	0.141	0.000	1.909	1.058	0.4%	0.140	1.057	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	0.400	0.000	0.333	0.208	0.000	1.560	1.086	0.2%	0.207	1.086	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	0.800	0.000	0.279	0.299	0.000	1.337	1.116	0.1%	0.298	1.115	0.0%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	1.600	0.000	0.201	0.385	0.000	1.195	1.084	0.1%	0.385	1.084	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	3.200	0.000	0.131	0.464	0.000	1.110	1.055	0.1%	0.463	1.055	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	6.400	0.000	0.077	0.523	0.000	1.060	1.033	0.1%	0.523	1.032	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	2	5.6	12.800	0.000	0.043	0.562	0.000	1.032	1.019	0.1%	0.561	1.018	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	0.100	0.000	0.341	0.193	0.000	5.664	1.080	4.8%	0.184	1.065	1.4%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	0.200	0.000	0.321	0.229	0.000	3.568	1.096	3.7%	0.221	1.082	1.3%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	0.400	0.000	0.292	0.284	0.000	2.429	1.121	1.9%	0.279	1.112	0.8%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	0.800	0.000	0.239	0.344	0.000	1.798	1.099	1.1%	0.340	1.093	0.6%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	1.600	0.000	0.178	0.412	0.000	1.448	1.074	0.6%	0.409	1.071	0.3%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	3.200	0.000	0.119	0.476	0.000	1.248	1.051	0.3%	0.475	1.048	0.2%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	6.400	0.000	0.073	0.528	0.000	1.134	1.031	0.2%	0.527	1.030	0.1%				
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	3	8.4	12.800	0.000	0.041	0.563	0.000	1.071	1.018	0.1%	0.562	1.017	0.1%				

Продолжение таблицы А.7

Численно-аналитический расчет																			Расчет ANSYS					
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	0.100	0.000	0.273	0.305	0.000	11.153	1.113	10.072	📉 -9.7%	0.275	1.065	📈 +4.4%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	0.200	0.000	0.258	0.323	0.000	6.256	1.107	5.752	📉 -8.1%	0.297	1.064	📈 +3.9%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	0.400	0.000	0.232	0.351	0.000	3.776	1.097	3.574	📉 -5.3%	0.332	1.066	📈 +2.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	0.800	0.000	0.196	0.391	0.000	2.495	1.082	2.418	📈 +3.1%	0.379	1.062	📈 +1.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	1.600	0.000	0.152	0.440	0.000	1.815	1.064	1.787	📈 +1.5%	0.434	1.053	📈 +1.1%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	3.200	0.000	0.106	0.491	0.000	1.443	1.045	1.433	📈 +0.7%	0.487	1.040	📈 +0.5%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	6.400	0.000	0.067	0.534	0.000	1.237	1.029	1.233	📈 +0.3%	0.532	1.026	📈 +0.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	4	11.2	12.800	0.000	0.039	0.565	0.000	1.125	1.018	1.122	📈 +0.2%	0.564	1.015	📈 +0.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	0.100	0.000	0.205	0.382	0.000	18.657	1.085	15.445	📉 -17.2%	0.316	0.977	📉 -10.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	0.200	0.000	0.196	0.392	0.000	10.002	1.082	8.575	📉 -14.3%	0.336	0.990	📉 -8.5%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	0.400	0.000	0.181	0.408	0.000	5.651	1.076	5.085	📉 -10.0%	0.367	1.008	📉 -6.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	0.800	0.000	0.158	0.434	0.000	3.442	1.066	3.230	📉 -6.2%	0.407	1.022	📈 +4.1%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	1.600	0.000	0.127	0.468	0.000	2.300	1.054	2.228	📈 +3.1%	0.453	1.030	📈 +2.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	3.200	0.000	0.093	0.505	0.000	1.695	1.040	1.671	📈 +1.4%	0.498	1.028	📈 +1.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	6.400	0.000	0.062	0.540	0.000	1.369	1.027	1.361	📈 +0.7%	0.537	1.021	📈 +0.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	5	14.0	12.800	0.000	0.037	0.568	0.000	1.194	1.017	1.189	📈 +0.4%	0.566	1.013	📈 +0.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1	1.9	0.100	0.000	0.712	0.088	0.000	1.239	1.037	1.245	📈 +0.5%	0.089	1.037	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	0.200	0.000	0.671	0.155	0.000	1.159	1.060	1.162	📈 +0.3%	0.156	1.060	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	0.400	0.000	0.582	0.259	0.000	1.110	1.061	1.112	📈 +0.1%	0.259	1.061	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	0.800	0.000	0.457	0.393	0.000	1.076	1.048	1.076	📈 +0.1%	0.393	1.049	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	1.600	0.000	0.326	0.547	0.000	1.049	1.052	1.049	📈 +0.0%	0.547	1.052	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	3.200	0.000	0.204	0.671	0.000	1.030	1.033	1.029	📈 +0.0%	0.671	1.032	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	6.400	0.000	0.117	0.760	0.000	1.017	1.019	1.016	📈 +0.1%	0.759	1.019	📈 +0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1	1.9	12.800	0.000	0.063	0.815	0.000	1.009	1.011	1.009	📈 +0.1%	0.814	1.010	📈 +0.1%

Продолжение таблицы А.7

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS							
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	$\alpha 2$	$\alpha 1$	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	0.100	0.000	0.676	0.147	0.000	2.176	1.057	2.216	1.8%	0.150	1.060	0.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	0.200	0.000	0.621	0.217	0.000	1.748	1.064	1.766	1.0%	0.219	1.066	0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	0.400	0.000	0.530	0.316	0.000	1.490	1.056	1.499	0.6%	0.318	1.059	0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	0.800	0.000	0.424	0.447	0.000	1.318	1.067	1.322	0.3%	0.448	1.069	0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	1.600	0.000	0.299	0.574	0.000	1.199	1.048	1.200	0.1%	0.575	1.048	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	3.200	0.000	0.191	0.684	0.000	1.117	1.031	1.117	0.0%	0.684	1.031	0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	6.400	0.000	0.112	0.765	0.000	1.066	1.018	1.065	0.1%	0.764	1.018	0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2	3.7	12.800	0.000	0.062	0.816	0.000	1.035	1.010	1.034	0.1%	0.815	1.010	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	0.100	0.000	0.574	0.268	0.000	4.673	1.060	4.677	0.1%	0.268	1.060	0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	0.200	0.000	0.520	0.327	0.000	3.142	1.056	3.131	0.4%	0.325	1.054	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	0.400	0.000	0.444	0.406	0.000	2.288	1.046	2.283	0.2%	0.405	1.045	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	0.800	0.000	0.360	0.512	0.000	1.776	1.057	1.776	0.0%	0.512	1.057	0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	1.600	0.000	0.262	0.612	0.000	1.462	1.042	1.461	0.0%	0.612	1.042	0.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	3.200	0.000	0.173	0.702	0.000	1.265	1.028	1.265	0.1%	0.702	1.027	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	6.400	0.000	0.105	0.772	0.000	1.147	1.017	1.145	0.1%	0.771	1.016	0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	3	5.6	12.800	0.000	0.059	0.818	0.000	1.078	1.010	1.077	0.1%	0.817	1.009	0.1%

Окончание таблицы А.7

Численно-аналитический расчет																	Расчет ANSYS							
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Ku	Kdx	ΔKd	Mx	Ku	ΔKu
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	0.100	0.000	0.429	0.421	0.000	9.792	1.044	9.676	✓ -1.2%	0.416	1.038	✓ -0.5%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	0.200	0.000	0.405	0.466	0.000	5.749	1.064	5.593	✓ -2.7%	0.453	1.050	✓ -1.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	0.400	0.000	0.355	0.517	0.000	3.641	1.056	3.585	✓ -1.5%	0.509	1.047	✓ -0.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	0.800	0.000	0.292	0.582	0.000	2.495	1.046	2.475	✓ -0.8%	0.577	1.041	✓ -0.5%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	1.600	0.000	0.221	0.654	0.000	1.848	1.035	1.841	✓ -0.4%	0.651	1.032	✓ -0.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	3.200	0.000	0.153	0.723	0.000	1.475	1.025	1.471	✓ -0.3%	0.721	1.023	✓ -0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	6.400	0.000	0.097	0.780	0.000	1.259	1.016	1.257	✓ -0.2%	0.779	1.014	✓ -0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	4	7.4	12.800	0.000	0.056	0.821	0.000	1.138	1.010	1.136	✓ -0.2%	0.820	1.008	✓ -0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	0.100	0.000	0.313	0.560	0.000	17.872	1.050	16.059	🟡 -10.1%	0.503	0.985	🟡 -6.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	0.200	0.000	0.296	0.577	0.000	9.744	1.047	9.065	🟡 -7.0%	0.537	1.001	🟡 -4.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	0.400	0.000	0.269	0.605	0.000	5.623	1.043	5.399	🟢 -4.0%	0.581	1.015	🟢 -2.6%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	0.800	0.000	0.230	0.644	0.000	3.495	1.037	3.422	✓ -2.1%	0.631	1.022	✓ -1.5%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	1.600	0.000	0.183	0.692	0.000	2.364	1.029	2.341	🟢 -1.0%	0.686	1.022	🟢 -0.7%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	3.200	0.000	0.133	0.743	0.000	1.747	1.022	1.738	✓ -0.5%	0.739	1.017	✓ -0.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	6.400	0.000	0.088	0.789	0.000	1.404	1.015	1.399	✓ -0.3%	0.787	1.012	✓ -0.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	5	9.3	12.800	0.000	0.053	0.825	0.000	1.214	1.009	1.211	✓ -0.3%	0.822	1.006	✓ -0.3%

Таблица А.8 – Устойчивость Сигма-профилей в плоскости меньшей жёсткости

Численно-аналитический расчёт																	Расчёт ANSYS						
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mх	mу	N	Mх	Mу	Kdy	Ku	ΔKd	Mу	Ku	ΔKu
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	0.100	0.381	0.000	0.057	1.495	0.937	0.5%	0.057	0.937	0.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	0.200	0.367	0.000	0.094	1.280	0.959	0.6%	0.093	0.958	-0.1%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	0.400	0.337	0.000	0.157	1.165	0.986	1.3%	0.155	0.984	-0.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	0.800	0.289	0.000	0.254	1.101	1.022	1.087	1.017	1.017	-0.4%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	1.600	0.217	0.000	0.369	1.064	1.031	1.051	1.024	1.024	-0.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	3.200	0.144	0.000	0.478	1.041	1.028	1.029	1.019	1.019	-0.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	6.400	0.086	0.000	0.563	1.028	1.023	1.016	1.013	1.013	-1.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.000	12.800	0.047	0.000	0.618	1.020	1.018	1.008	1.008	1.008	-1.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	0.100	0.358	0.000	0.116	3.230	0.972	3.182	0.969	0.969	-0.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	0.200	0.341	0.000	0.150	2.199	0.984	2.151	0.979	0.979	-0.5%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	0.400	0.312	0.000	0.208	1.663	1.005	1.633	0.999	0.999	-0.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	0.800	0.266	0.000	0.295	1.382	1.031	1.362	1.025	1.025	-0.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	1.600	0.201	0.000	0.393	1.224	1.030	1.207	1.022	1.022	-0.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	3.200	0.135	0.000	0.490	1.132	1.027	1.117	1.018	1.018	-0.9%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	6.400	0.082	0.000	0.568	1.077	1.023	1.064	1.012	1.012	-1.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.000	12.800	0.046	0.000	0.619	1.046	1.018	1.034	1.007	1.007	-1.1%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	0.100	0.312	0.000	0.209	6.698	1.005	6.313	0.988	0.988	-1.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	0.200	0.297	0.000	0.237	3.984	1.016	3.787	0.998	0.998	-1.7%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	0.400	0.273	0.000	0.285	2.608	1.031	2.508	1.015	1.015	-1.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	0.800	0.231	0.000	0.349	1.891	1.031	1.840	1.017	1.017	-1.4%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	1.600	0.178	0.000	0.428	1.503	1.030	1.471	1.017	1.017	-1.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	3.200	0.124	0.000	0.508	1.283	1.026	1.263	1.014	1.014	-1.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	6.400	0.077	0.000	0.575	1.159	1.022	1.143	1.010	1.010	-1.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.071	3.0	0.000	12.800	0.045	0.000	0.622	1.089	1.018	1.075	1.006	1.006	-1.2%

Продолжение таблицы А.8

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS											
Ry, МПа	d/t	λ_w	α_f	α_c	α_2	α_1	α_k	r _z	r _x	r _y	λ_x	λ_y	m _x	m _y	N	M _x	M _y	K _{dy}	K _u	K _{dy}	ΔK_d	M _y	K _u	ΔK_u		
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	0.100	0.253	0.000	0.315	12.480	1.031	11.028		-11.6%	0.279	0.977		-5.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	0.200	0.241	0.000	0.333	6.911	1.031	6.225		-9.9%	0.300	0.982		-4.7%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	0.400	0.221	0.000	0.363	4.102	1.031	3.789		-7.6%	0.335	0.990		-4.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	0.800	0.191	0.000	0.408	2.664	1.030	2.530		-5.0%	0.387	1.000		-2.9%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	1.600	0.152	0.000	0.465	1.908	1.028	1.844		-3.3%	0.450	1.005		-2.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	3.200	0.110	0.000	0.528	1.499	1.025	1.465		-2.3%	0.516	1.008		-1.7%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	6.400	0.072	0.000	0.583	1.273	1.021	1.252		-1.7%	0.573	1.007		-1.4%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.429	4.0	0.000	12.800	0.042	0.000	0.625	1.149	1.018	1.133		-1.4%	0.616	1.005		-1.3%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	0.100	0.194	0.000	0.404	20.790	1.030	16.760		-19.4%	0.325	0.915		-11.2%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	0.200	0.187	0.000	0.414	11.068	1.030	9.239		-16.5%	0.346	0.929		-9.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	0.400	0.175	0.000	0.432	6.186	1.030	5.394		-12.8%	0.377	0.948		-8.0%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	0.800	0.155	0.000	0.461	3.717	1.029	3.403		-8.4%	0.422	0.971		-5.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	1.600	0.128	0.000	0.501	2.447	1.027	2.316		-5.4%	0.474	0.987		-3.9%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	3.200	0.096	0.000	0.548	1.779	1.024	1.721		-3.2%	0.530	0.998		-2.6%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	6.400	0.065	0.000	0.592	1.420	1.021	1.389		-2.1%	0.580	1.002		-1.8%
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	1.786	5.0	0.000	12.800	0.040	0.000	0.628	1.226	1.017	1.206		-1.6%	0.618	1.002		-1.5%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	0.100	0.697	0.000	0.092	1.313	1.019	1.301		-1.0%	0.091	1.018		-0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	0.200	0.655	0.000	0.156	1.194	1.037	1.183		-0.9%	0.155	1.035		-0.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	0.400	0.574	0.000	0.259	1.128	1.045	1.119		-0.8%	0.257	1.043		-0.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	0.800	0.460	0.000	0.400	1.087	1.053	1.078		-0.8%	0.397	1.049		-0.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	1.600	0.324	0.000	0.549	1.059	1.041	1.050		-0.8%	0.544	1.036		-0.5%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	3.200	0.204	0.000	0.679	1.038	1.029	1.030		-0.8%	0.673	1.023		-0.6%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	6.400	0.118	0.000	0.773	1.025	1.021	1.016		-0.8%	0.767	1.014		-0.7%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	0.539	1.0	0.000	12.800	0.064	0.000	0.831	1.017	1.015	1.009		-0.8%	0.825	1.007		-0.7%

Продолжение таблицы А.8

Численно-аналитический расчет															Расчет ANSYS							
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	ΔKd	My	Ku	ΔKu
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	0.100	0.653	0.000	0.160	2.449	1.038	2.405	1.035	Δ-1.8%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	0.200	0.602	0.000	0.224	1.864	1.043	1.837	1.040	Δ-1.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	0.400	0.523	0.000	0.322	1.540	1.049	1.525	1.045	Δ-1.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	0.800	0.416	0.000	0.448	1.344	1.049	1.331	1.044	Δ-1.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	1.600	0.297	0.000	0.578	1.215	1.038	1.204	1.032	Δ-0.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	3.200	0.192	0.000	0.693	1.129	1.028	1.119	1.021	Δ-0.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	6.400	0.113	0.000	0.778	1.075	1.020	1.066	1.013	Δ-0.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.079	2.0	0.000	12.800	0.062	0.000	0.833	1.044	1.015	1.035	1.007	Δ-0.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	0.100	0.551	0.000	0.287	5.209	1.047	4.978	1.032	Δ-4.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	0.200	0.507	0.000	0.342	3.368	1.050	3.258	1.037	Δ-3.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	0.400	0.441	0.000	0.421	2.385	1.051	2.336	1.041	Δ-2.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	0.800	0.353	0.000	0.516	1.826	1.043	1.798	1.034	Δ-1.6%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	1.600	0.260	0.000	0.619	1.489	1.035	1.470	1.026	Δ-1.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	3.200	0.174	0.000	0.713	1.283	1.026	1.268	1.018	Δ-1.1%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	6.400	0.106	0.000	0.786	1.159	1.019	1.148	1.011	Δ-1.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	1.618	3.0	0.000	12.800	0.060	0.000	0.836	1.088	1.015	1.078	1.006	Δ-0.9%

Окончание таблицы А.8

Численно-аналитический расчет																Расчет ANSYS							
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdy	ΔKd	My	Ku	ΔKu	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	0.100	0.418	0.000	0.445	10.645	1.049	9.619	0.402	1.001	🟡 -9.6%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	0.200	0.389	0.000	0.478	6.142	1.047	5.699	0.443	1.008	🟡 -7.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	0.400	0.345	0.000	0.526	3.817	1.043	3.653	0.504	1.017	🟢 -4.3%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	0.800	0.286	0.000	0.590	2.577	1.037	2.505	0.573	1.019	🟢 -2.8%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	1.600	0.219	0.000	0.663	1.891	1.031	1.854	0.650	1.017	🟢 -1.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	3.200	0.153	0.000	0.735	1.500	1.024	1.478	0.724	1.012	🟢 -1.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	6.400	0.097	0.000	0.795	1.276	1.019	1.261	0.786	1.008	🟢 -1.2%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.158	4.0	0.000	12.800	0.057	0.000	0.839	1.150	1.014	1.138	0.830	1.005	🟢 -1.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	0.100	0.302	0.000	0.573	18.986	1.039	15.681	0.473	0.927	🟡 -17.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	0.200	0.287	0.000	0.589	10.278	1.037	9.007	0.517	0.956	🟡 -12.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	0.400	0.262	0.000	0.616	5.877	1.035	5.416	0.568	0.981	🟡 -7.8%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	0.800	0.226	0.000	0.655	3.617	1.032	3.441	0.623	0.996	🟢 -4.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	1.600	0.181	0.000	0.704	2.426	1.027	2.355	0.683	1.004	🟢 -3.0%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	3.200	0.133	0.000	0.757	1.781	1.022	1.747	0.742	1.006	🟢 -1.9%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	6.400	0.088	0.000	0.805	1.425	1.018	1.405	0.794	1.005	🟢 -1.4%
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.76	0.878	0.893	2.697	5.0	0.000	12.800	0.054	0.000	0.842	1.229	1.014	1.215	0.833	1.003	🟢 -1.2%

Таблица А.9 – Устойчивость Сигма-профилей по изгибно-крутильной форме

Численно-аналитический расчет																									Расчет ANSYS									
Ry, МПа	d/t	λ_w	α_f	α_c	α_2	α_1	α_k	rz	rx	ry	λ_x	λ_y	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Kdy	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	Mx	My	Ku	ΔKu							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.100	0.050	0.387	0.039	0.033	1.016	1.677	0.978	1.016	1.677	0.0%	0.039	0.032	0.978	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.200	0.050	0.388	0.079	0.025	1.019	1.278	1.036	1.019	1.278	0.0%	0.079	0.025	1.036	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.400	0.050	0.360	0.146	0.020	1.015	1.115	1.077	1.015	1.115	0.0%	0.146	0.020	1.076	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	0.800	0.050	0.306	0.247	0.017	1.010	1.131	1.115	1.010	1.116	-0.1%	0.247	0.017	1.115	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	1.600	0.050	0.221	0.356	0.012	1.007	1.067	1.096	1.006	1.054	-0.1%	0.355	0.012	1.096	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	3.200	0.050	0.140	0.449	0.007	1.004	1.046	1.062	1.003	1.033	-0.1%	0.449	0.007	1.061	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	6.400	0.050	0.081	0.517	0.004	1.003	1.031	1.036	1.002	1.019	-0.1%	0.516	0.004	1.035	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.357	1.0	12.800	0.050	0.044	0.559	0.002	1.002	1.022	1.020	1.001	1.010	-0.1%	0.559	0.002	1.019	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	0.100	0.095	0.370	0.038	0.072	1.030	2.058	0.997	1.029	2.049	-0.1%	0.038	0.072	0.997	0.0%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	0.200	0.095	0.370	0.077	0.061	1.034	1.742	1.045	1.034	1.732	-0.1%	0.077	0.061	1.044	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	0.400	0.095	0.353	0.146	0.044	1.032	1.305	1.096	1.031	1.291	-0.1%	0.146	0.043	1.095	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	0.800	0.095	0.297	0.243	0.035	1.021	1.256	1.117	1.021	1.243	-0.1%	0.243	0.035	1.117	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	1.600	0.095	0.217	0.352	0.024	1.014	1.144	1.099	1.013	1.130	-0.1%	0.352	0.023	1.098	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	3.200	0.095	0.138	0.446	0.014	1.008	1.092	1.063	1.008	1.080	-0.1%	0.445	0.014	1.063	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	6.400	0.095	0.080	0.515	0.008	1.005	1.057	1.037	1.004	1.045	-0.1%	0.514	0.008	1.037	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.536	1.5	12.800	0.095	0.043	0.558	0.004	1.003	1.036	1.021	1.002	1.024	-0.1%	0.557	0.004	1.020	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.100	0.140	0.349	0.037	0.120	1.048	2.443	1.018	1.047	2.373	-0.1%	0.037	0.116	1.013	-0.5%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.200	0.140	0.347	0.073	0.109	1.047	2.252	1.057	1.046	2.192	-0.1%	0.073	0.106	1.052	-0.4%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.400	0.140	0.345	0.145	0.077	1.052	1.596	1.124	1.052	1.568	-0.1%	0.145	0.076	1.122	-0.2%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	0.800	0.140	0.287	0.238	0.059	1.036	1.461	1.121	1.035	1.438	-0.1%	0.238	0.058	1.119	-0.2%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	1.600	0.140	0.212	0.347	0.038	1.023	1.266	1.102	1.023	1.249	-0.1%	0.347	0.037	1.101	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	3.200	0.140	0.136	0.442	0.022	1.014	1.163	1.065	1.013	1.148	-0.1%	0.442	0.022	1.064	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	6.400	0.140	0.079	0.512	0.012	1.008	1.096	1.038	1.007	1.081	-0.1%	0.512	0.012	1.038	-0.1%							
330	5	8	0.3	0.2	0.25	0.4	0.3	0.447	0.608	0.677	0.714	2.0	12.800	0.140	0.043	0.556	0.006	1.005	1.056	1.022	1.004	1.043	-0.1%	0.556	0.006	1.021	-0.1%							

Продолжение таблицы А.9

Численно-аналитический расчет																				Расчет ANSYS									
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	α2	α1	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Kdy	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	0.100	0.050	0.709	0.075	0.044	1.052	1.232	1.066	1.052	1.229	0.0%	0.0%	0.075	0.044	1.066	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	0.200	0.050	0.668	0.139	0.040	1.038	1.205	1.082	1.038	1.202	0.0%	0.0%	0.139	0.040	1.081	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	0.400	0.050	0.580	0.238	0.034	1.029	1.170	1.072	1.028	1.166	0.0%	0.0%	0.238	0.034	1.072	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	0.800	0.050	0.456	0.372	0.026	1.021	1.127	1.052	1.020	1.120	0.0%	0.0%	0.372	0.026	1.052	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	1.600	0.050	0.327	0.530	0.018	1.014	1.095	1.054	1.013	1.089	0.0%	0.0%	0.530	0.018	1.054	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	3.200	0.050	0.205	0.661	0.011	1.009	1.061	1.034	1.008	1.053	0.0%	0.0%	0.661	0.011	1.034	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	6.400	0.050	0.117	0.754	0.006	1.005	1.038	1.020	1.005	1.030	0.0%	0.0%	0.754	0.006	1.019	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.539	1.0	12.800	0.050	0.063	0.812	0.003	1.003	1.024	1.011	1.002	1.016	0.0%	0.0%	0.811	0.003	1.011	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	0.100	0.095	0.676	0.073	0.100	1.087	1.554	1.085	1.086	1.544	0.0%	0.0%	0.073	0.099	1.084	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	0.200	0.095	0.633	0.136	0.089	1.072	1.485	1.087	1.071	1.477	0.0%	0.0%	0.136	0.089	1.086	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	0.400	0.095	0.551	0.233	0.075	1.057	1.426	1.073	1.056	1.420	0.0%	0.0%	0.233	0.074	1.073	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	0.800	0.095	0.436	0.364	0.057	1.042	1.379	1.053	1.041	1.371	0.0%	0.0%	0.364	0.057	1.052	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	1.600	0.095	0.318	0.523	0.037	1.030	1.220	1.055	1.029	1.210	0.0%	0.0%	0.523	0.037	1.055	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	3.200	0.095	0.201	0.655	0.022	1.019	1.134	1.035	1.018	1.123	0.0%	0.0%	0.655	0.021	1.034	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	6.400	0.095	0.116	0.750	0.012	1.011	1.078	1.020	1.010	1.068	0.0%	0.0%	0.750	0.012	1.020	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	0.809	1.5	12.800	0.095	0.063	0.809	0.006	1.006	1.045	1.011	1.006	1.036	0.0%	0.0%	0.809	0.006	1.011	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	0.100	0.140	0.625	0.072	0.162	1.147	1.850	1.085	1.146	1.831	0.0%	0.0%	0.072	0.160	1.083	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	0.200	0.140	0.590	0.132	0.145	1.122	1.756	1.089	1.120	1.738	0.0%	0.0%	0.132	0.143	1.087	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	0.400	0.140	0.518	0.227	0.122	1.095	1.682	1.077	1.094	1.664	0.0%	0.0%	0.227	0.121	1.075	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	0.800	0.140	0.416	0.357	0.092	1.072	1.582	1.057	1.071	1.561	0.0%	0.0%	0.356	0.091	1.055	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	1.600	0.140	0.306	0.515	0.061	1.051	1.418	1.057	1.050	1.396	0.0%	0.0%	0.514	0.060	1.056	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	3.200	0.140	0.196	0.649	0.035	1.032	1.255	1.036	1.032	1.235	0.0%	0.0%	0.648	0.034	1.035	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	6.400	0.140	0.114	0.746	0.018	1.019	1.142	1.021	1.018	1.125	0.0%	0.0%	0.746	0.018	1.020	0.0%	
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.079	2.0	12.800	0.140	0.062	0.807	0.009	1.010	1.078	1.012	1.010	1.064	0.0%	0.0%	0.806	0.009	1.011	0.0%	

Окончание таблицы А.9

Численно-аналитический расчет																											Расчет ANSYS									
Ry, МПа	d/t	λw	αf	αc	$\alpha 2$	$\alpha 1$	αk	rz	rx	ry	λx	λy	mx	my	N	Mx	My	Kdx	Kdy	Ku	Kdx	Kdy	ΔKdx	ΔKdy	Mx	My	Ku	ΔKu								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	0.100	0.230	0.498	0.063	0.318	1.273	2.777	1.084	1.269	2.707	✓ -0.3%	✓ -2.5%	0.063	0.310	1.074	✓ -0.9%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	0.200	0.230	0.481	0.119	0.287	1.239	2.592	1.091	1.236	2.520	✓ -0.2%	✓ -2.8%	0.119	0.279	1.082	✓ -0.9%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	0.400	0.230	0.434	0.207	0.243	1.191	2.434	1.080	1.189	2.338	✓ -0.1%	✓ -3.9%	0.207	0.234	1.069	✓ -1.0%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	0.800	0.230	0.362	0.332	0.186	1.147	2.237	1.062	1.146	2.098	✓ -0.1%	✓ -6.2%	0.332	0.175	1.049	✓ -1.3%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	1.600	0.230	0.278	0.491	0.126	1.106	1.976	1.066	1.104	1.798	✓ -0.1%	✓ -9.0%	0.491	0.115	1.052	✓ -1.2%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	3.200	0.230	0.184	0.629	0.074	1.068	1.748	1.041	1.067	1.566	✓ -0.1%	✓ -10.4%	0.628	0.066	1.032	✓ -0.9%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	6.400	0.230	0.110	0.734	0.037	1.040	1.476	1.023	1.040	1.336	✓ -0.1%	✓ -9.5%	0.733	0.034	1.018	✓ -0.5%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	1.618	3.0	12.800	0.230	0.061	0.801	0.017	1.023	1.243	1.013	1.022	1.162	✓ -0.1%	✓ -6.5%	0.800	0.016	1.011	✓ -0.2%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	0.100	0.320	0.367	0.050	0.478	1.358	4.075	1.075	1.352	3.868	✓ -0.5%	✓ -5.1%	0.050	0.454	1.048	✓ -2.6%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	0.200	0.320	0.365	0.098	0.448	1.342	3.832	1.094	1.336	3.559	✓ -0.4%	✓ -7.1%	0.098	0.416	1.058	✓ -3.3%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	0.400	0.320	0.337	0.172	0.397	1.279	3.677	1.084	1.275	3.222	✓ -0.3%	✓ -12.4%	0.172	0.348	1.029	✓ -5.1%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	0.800	0.320	0.290	0.283	0.328	1.220	3.539	1.070	1.217	2.756	✓ -0.2%	✓ -22.1%	0.282	0.255	0.988	✓ -7.7%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	1.600	0.320	0.226	0.419	0.252	1.160	3.488	1.057	1.158	2.285	✓ -0.2%	✓ -34.5%	0.418	0.165	0.959	✓ -9.3%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	3.200	0.320	0.159	0.562	0.184	1.106	3.631	1.055	1.104	1.880	✓ -0.1%	✓ -48.2%	0.561	0.095	0.955	✓ -9.5%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	6.400	0.320	0.099	0.671	0.129	1.064	4.095	1.039	1.062	1.659	✓ -0.1%	✓ -59.5%	0.670	0.052	0.952	✓ -8.4%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.158	4.0	12.800	0.320	0.056	0.747	0.088	1.036	4.892	1.024	1.035	1.500	✓ -0.1%	✓ -69.3%	0.746	0.027	0.955	✓ -6.8%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	0.100	0.410	0.265	0.038	0.596	1.423	5.482	1.059	1.416	4.995	✓ -0.5%	✓ -8.9%	0.038	0.543	1.000	✓ -5.6%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	0.200	0.410	0.265	0.075	0.576	1.414	5.290	1.079	1.405	4.600	✓ -0.7%	✓ -13.0%	0.075	0.501	0.995	✓ -7.8%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	0.400	0.410	0.249	0.133	0.538	1.339	5.273	1.081	1.331	3.962	✓ -0.6%	✓ -24.9%	0.132	0.404	0.930	✓ -13.9%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	0.800	0.410	0.215	0.217	0.488	1.263	5.536	1.076	1.256	3.146	✓ -0.5%	✓ -43.2%	0.216	0.277	0.839	✓ -22.0%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	1.600	0.410	0.167	0.317	0.436	1.188	6.379	1.068	1.183	2.412	✓ -0.4%	✓ -62.2%	0.315	0.165	0.763	✓ -28.6%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	3.200	0.410	0.114	0.409	0.396	1.121	8.478	1.059	1.118	1.902	✓ -0.3%	✓ -77.6%	0.408	0.089	0.714	✓ -32.6%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	6.400	0.410	0.069	0.475	0.377	1.070	13.251	1.054	1.068	1.586	✓ -0.2%	✓ -88.0%	0.474	0.045	0.682	✓ -35.3%								
330	5	4	0.4	0.3	0.25	0.4	0.3	0.760	0.878	0.893	2.697	5.0	12.800	0.410	0.039	0.515	0.380	1.038	23.904	1.063	1.037	1.373	✓ -0.1%	✓ -94.3%	0.514	0.022	0.661	✓ -37.8%								

Приложение Б (обязательное)



ЦНИИ
Проект
СтальКонструкция

ООО «ЦНИИ ПроектСтальКонструкция»
☎ +7 (495) 932-70-11
📍 Российская Федерация, 119607, г. Москва,
Мичуринский пр-т, д. 37, эт. 1, пом. 1, ком. 5
✉ cniipsk.info@gmail.com 🌐 cri-scd.com

«10» июля 2026 г. №07/115

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Гарипова Азата Ильшатовича «Разработка методов расчета стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций».

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертации «Разработка методов расчета стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций» Гарипова Азата Ильшатовича используются специалистами ООО «ЦНИИ ПроектСтальКонструкция» в практической работе при проектировании объектов с использованием каркасов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК).

Разработанные практические методы расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, гармонизированные с положениями свода правил СП 16.13330.2017, существенно упрощают проектирование сжато-изгибаемых элементов. Новый метод расчета устойчивости по изгибно-крутильной форме позволяет снизить металлоемкость конструкций как за счет более полного использования резервов устойчивости основных несущих элементов, так и за счет увеличения шага расстановки второстепенных элементов раскрепления.

Директор

ООО «ЦНИИ ПроектСтальКонструкция»,
Доктор технических наук, профессор, член-корр. МИА



В.В. Ларионов