

Международная образовательная корпорация

УДК 69.07

На правах рукописи

БРЯНЦЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Совершенствование конструктивных решений и методов расчета
сварных двутавровых балок с гофрированными стенками,
ослабленных технологическими отверстиями

Специальность 6D072900 – Строительство

Диссертация на соискание степени доктора философии PhD

Научные консультанты:

Отечественный научный консультант
Абсиметов В.Э., д.т.н, профессор

Зарубежный научный консультант
Лалин В.В., д.т.н, профессор

Республика Казахстан

Алматы, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ	9
1.1 История применения гофрированных конструкций.....	10
1.2 Экспериментально–теоретические исследования металлических конструкций с гофрированной стенкой на территории Республики Казахстан и за рубежом	15
1.2.1 Анализ результатов испытаний стенки двутавровой балки на прочность	19
1.2.2 Анализ результатов испытаний стенки двутавровой балки на устойчивость	20
1.2.3 Испытание стенки двутавровой балкой, ослабленной отверстиями на устойчивость	21
1.3 Технология изготовления и монтажа элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой систем «Алма–Ата» и «БГС–Казахстан». Выводы по 1 разделу.....	21 22
2 ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГОФРИРОВАННЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ОСЛАБЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ	24
2.1 Общие положения	24
2.2 Теоретические и экспериментальные исследования гофрированных двутавровых балок, ослабленных отверстиями.....	24
2.2.1 Концентрация напряжений вблизи круговых отверстий в гофрированной стенке балки	25
2.2.2 Конструктивные решения по усилению круглых отверстий поперечно–гофрированной стенки балки.....	25
2.3 Основные положения расчета балок с гофрированной стенкой в нормативных казахстанских и зарубежных документах	27
2.3.1 Современное положение строительных норм на территории Республики Казахстан	27
2.3.1.1 Расчет гофрированных стенок и полок двутаврового сечения на местную и общую устойчивость.....	27
2.3.1.2 Расчет на прочность элементов двутаврового сечения с поперечно–гофрированной стенкой.....	30
2.3.1.3 Предложения по выбору отверстий в балке с поперечно–гофрированной стенкой.....	32
2.3.2 Проектирование гофрированных конструкций с учетом требований СН РК EN 1993–1–5:2006/2011	33
2.3.2.1 Определение несущей способности по минимальному изгибу	34
2.3.2.2 Определение несущей способности при сдвиге	34
2.3.3 Требования к проектированию и расчету в зарубежных нормативных документах.....	35
Выводы по 2 разделу.....	36

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ СТенок С РАЗЛИЧНЫМ ОЧЕРТАНИЕМ ГОФРОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ.....	38
3.1 Оценка геометрических параметров гофров с плоской, волнообразной, трапециевидной и треугольной формой стенки.....	38
3.2 Оценка влияния параметров гофров на их устойчивость стенки	38
3.3 Оценка влияния параметров гофров на их прочность стенки.....	43
3.4 Сравнительный анализ по расходу стали в гофрированных стенках.....	48
3.5 Классификация поперечного сечения гофрированной балки	52
Выводы по 3 разделу.....	56
4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЯМИ.....	60
4.1 Цели и задачи математического моделирования.....	60
4.1.1 Методика планирования эксперимента	60
4.4 Сравнительный анализ экспериментальных, теоретических и данных компьютерного моделирования балки с гофрированной стенкой.....	66
4.4.1 Двухопорная балка с гофрированной стенкой, ослабленная тремя технологическими отверстиями	66
4.5 Параметрическое исследование гофрированной стенки балки с гофрами треугольного очертания с различным диаметром и шагом отверстий.....	70
4.5.1 Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без отверстий и с тремя отверстиями в стенке с различным диаметром и шагом отверстий.....	73
4.5.1.1 Анализ работы балок с двумя отверстиями	76
4.5.1.2 Анализ работы балок с тремя отверстиями.....	87
4.5.2 Определение влияния расположения отверстия по высоте гофрированной стенки.....	97
4.5.3 Влияние усиления круговых отверстий на увеличение сопротивления к потере устойчивости	98
4.5.4 Определение влияния усиления зоны отверстия полуторной и двойной стенкой	102
Выводы по 4 разделу.....	106
5 ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИНЯТЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ	111
5.1 Планирование проведения эксперимента.....	111
5.2 Опытные образцы и методика проведения исследований.....	111
5.3 Оценка влияния особенностей конструктивной формы подкрепления отверстий на несущую способность балок.....	114
5.4 Дисперсионный анализ полученных данных	127
5.5 Экономическая эффективность расхода стали на усиление отверстий.....	133
Выводы по 5 разделу.....	134

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы в производственный процесс	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Фотографии внедренных результатов диссертационной работы в производственный процесс	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент на полезную модель (Балка БГС–3)	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент на полезную модель (Балка БГС–5).....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Данные для определения наиболее эффективных форм и параметров гофров	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Компьютерное моделирование консольных балок с гофрированной стенкой	173
ПРИЛОЖЕНИЕ И Численное исследование работы экспериментальных сварных двутавровых балок, ослабленных технологическими отверстиями..	181
ПРИЛОЖЕНИЕ К Протокол испытания листа толщиной 2 мм.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Протокол испытания листа толщиной 6 мм	198
ПРИЛОЖЕНИЕ М Сертификат о поверке динамометра электронного АЦД/1С–2000/5И–1	199
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Сертификат о калибровке Манометра деформационного образцового.....	200
Приложение О Сертификат о поверке прогибомеров ПСК–МКГ4	201

ВВЕДЕНИЕ

Перед конструкторами и проектировщиками постоянно стоит задача максимально эффективного использования металлических конструкций. Современный уровень развития строительной индустрии и народного хозяйства требует высокий уровень ответственности по обеспечению строительных конструкций надежностью, прочностью и экономичностью. Все это невозможно выполнить без современных методов расчета, которые бы обеспечили все необходимые требования технических регламентов по безопасности.

Казахстан располагает всем необходимым для широкого использования гофрированных металлических конструкций. Это заводы с необходимыми станками для гофрирования и прессовым оборудованием, позволяющие сократить сроки изготовления конструкций, а также повысить качество строительства и уменьшить трудозатраты при правильном использовании автоматизированных операций при изготовлении строительных конструкций на поточных линиях, аналогичных тем, что используют при изготовлении гофрированных конструкций зарубежные производители.

При проектировании некоторых объектов возникает необходимость устройства в гофрированных стенках балок отверстий различного диаметра для пропуска технологического оборудования в пределах строительной высоты балки, хотя это снижает несущую способность стенки. Отсутствие информации о характере работы, величинах критических напряжений, устойчивости гофрированных стенок балок, ослабленных отверстиями, вызвало необходимость проведения соответствующих исследований, для которых в стенках балок были бы образованы отверстия различного диаметра и с различными способами их подкрепления.

Актуальность темы

Одним из факторов, повышающим надежность стальных каркасов зданий и сооружений является выбор правильной формы конструкций, а это в наибольшей степени зависит от способности всех элементов поглощать энергию внешних воздействий за счет пластической работы стали, а именно от способности, например, балок двутаврового сечения работать при возможных перегрузках в упругопластической стадии, а это в основном зависит от обеспечения устойчивости их стенок.

Балки двутаврового сечения могут длительное время воспринимать значительные перегрузки в условиях знакопеременного циклического нагружения и в случаях применения тонких стенок, если эти стенки будут не плоскими, а гофрированными. Гофрирование обеспечивает устойчивость стенки при минимальной ее толщине.

Поэтому важной задачей является разработка новых конструктивных форм и методов их расчета балок с гофрированной стенкой, в том числе, ослабленных отверстиями, которые отличались бы повышенной сейсмостойкостью, низкой материалоемкостью и не требовали бы больших затрат на антисейсмические мероприятия.

Поскольку в настоящее время в казахстанских и зарубежных нормативных источниках предложен только один вариант усиления отверстий в гофрированной стенке, то разработка новых и усовершенствование существующих методов усиления круглых отверстий и методов расчета представляет собой актуальную задачу.

Объектом диссертационного исследования являются балки, с поперечно гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров, имеющих различные геометрические параметры и ослабленные круглыми технологическими отверстиями, с различным диаметром и шагом по длине и высоте стенки.

Предметом диссертационного исследования является определение влияния шага и диаметра технологического отверстия на деформативность сварной балки с гофрированной стенкой, определение оптимальных параметров гофров и их очертания, усовершенствование конструктивных решений усиления технологических отверстий и методов расчета балок с гофрированной стенкой.

Цель исследования:

Определить наиболее оптимальные и эффективные очертания гофров и его параметров, диаметр и шаг отверстий по длине и высоте гофрированной стенки для усовершенствования сварных двутавровых балок с гофрированными стенками, способов усиления отверстий и методов их расчета.

Задачи исследования:

1. Изучить область применения балок с гофрированными стенками с различным очертанием гофров.
2. Исследовать имеющиеся методики расчета балок с гофрированными стенками, приведенные в местных и зарубежных нормативных источниках.
3. Исследовать эффективность работы сварных балок с гофрированными стенками различного сечения и параметров гофров.
4. Обосновать эффективность использования балок с поперечно-гофрированной стенкой, гофрами различных очертаний и параметров и определить их влияние на их устойчивость и прочность.
5. Определить наиболее оптимальный шаг отверстий по длине и высоте стенки балки и диаметр отверстий.
6. Определить влияние различных конструктивных решений по усилению технологических отверстий на деформативность гофрированной балки.
7. Совершенствовать конструктивные решения по усилению технологических отверстий.
8. Провести лабораторные испытания экспериментальных моделей балок с гофрированной стенкой с отверстиями и без отверстий.
9. Выполнить численное экспериментальное исследование методом однофакторного дисперсионного анализа по определению эффективного способа подкрепления отверстий.

Научная новизна работы:

1. Определены эффективные параметры гофров треугольного очертания с толщиной стенки от 2 до 10 мм.
2. В соответствии с требованиями Еврокодов определена классификация поперечного сечения балки с гофрированной стенкой.

3. Определен оптимальный шаг расположения отверстий и диаметр для двух и трех отверстий.

4. Определено оптимальное расположение отверстия по высоте стенки относительно сжатого или растянутого пояса.

5. Исследовано влияние различных вариантов усиления технологических отверстий на деформативность балки с гофрированной стенкой.

6. Выполнен теоретический расчет сварной балки с гофрированной стенкой с отверстием и без отверстия комбинированным методом, а также подобран программный комплекс для расчета подобных конструкций.

7. Исследовано и усовершенствованно конструктивное решение усиления технологического отверстия в гофрированной стенке.

Внедрение результатов исследований

Результаты диссертационного исследования используются проектным институтом при проектировании зданий и сооружений, несущие конструкции которых выполнены из металлических сварных балок с гофрированной стенкой, ослабленных технологическими отверстиями, а также результаты работы использованы при проектировании несущих металлических конструкций стадии КМ. Акт внедрения № 01–58 от 2 сентября 2019 г. приводится к диссертации в Приложении А, а фотографии объекта приводятся в Приложении Б. Также результаты диссертационного исследования были внедрены в учебный процесс. Акт внедрения № 10–03/696 от 10 сентября 2019 г. приводится в Приложении В.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций базируется на имеющихся допущениях в теории тонкостенных стержней, механики деформируемого твердого тела, теории строительных конструкций и устойчивости пластин, а также на примерах компьютерного моделирования и натурального эксперимента. На усовершенствованные модели балок с гофрированными стенками получены патенты на полезную модель (Приложение Г и Д).

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования обсуждались:

– на международной научно–практической конференции «Актуальные научные исследования в современном мире» (г. Переяслав–Хмельницкий, 2016 г.);

– на международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительства: инновации, модернизация и энергоэффективность» (г. Алматы, 2017 г.);

– на международной научно–практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (г. Белгород, 2018 г.);

– на международной научно–практической конференции, «Современные тренды в архитектуре и строительстве: энергоэффективность, энергосбережение, BIM технологии, проблемы городской среды» (г. Алматы, 12 апреля, 2019 г.);

– на круглом столе «Гофробалки. Современное состояние и тенденции развития», (г. Москва, 2019 г.);

– на международной научной конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019)», (г. Санкт - Петербург, 2019 г.).

– на расширенном заседании Факультета общего строительства Международной образовательной корпорации (МОК) в 2019 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе семь статей опубликованы в научных и научно–практических изданиях, включенных в Перечень рекомендуемых ККСОН МОН РК; пять статей в материалах международных конференций; пять статей в международных рецензируемых научных журналах и конференциях, в том числе одна статья, в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, с процентилем по строительству 84 и CiteScore 2,75.

Состав и объем работ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Объем работы составляет 149 страниц машинописного текста и содержит 52 таблицы, 89 рисунков, список использованных источников из 157 наименований и 13 приложений, объемом 56 страниц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

Основные задачи технико–экономического характера в области строительства зданий и сооружений из ЛМК «легкие металлические конструкции» связаны:

- 1) с уменьшением массы металла;
- 2) с понижением трудоемкости изготовления строительных конструкций;
- 3) со снижением стоимости стальных конструкций;
- 4) с увеличением скорости строительства за счет снижения массы конструкции и компактности;
- 5) с повышением срока эксплуатации, за счет правильной антикоррозионной защиты металла, правильной подборки класса стали, влияющего на несущую способность конструкции.

Для решения этих задач необходим правильный учет всех факторов, связанных с образованием и научно–техническим прогрессом в области развития металлургической промышленности, машиностроения, сварочного производства с совершенствованием конструктивных оптимальных форм основных несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

Гофрированная двутавровая балка – это балка, пояса которой выполнены из металла произвольного сечения и гофрированной (изогнутой) стенки в поперечном направлении. У балок гофрированные стенки могут быть с треугольным профилем гофрирования, волнистым, трапециевидным, прямоугольным и т.д. Пояса таких балок выполняются из прокатной стали, гнутых профилей, электросварных труб, железобетонных элементов [1].

В основном балки с поперечно–гофрированной стенкой и гофрами треугольного очертания применяют для строительства в Казахстане (рисунок 1) [2 – 5]:

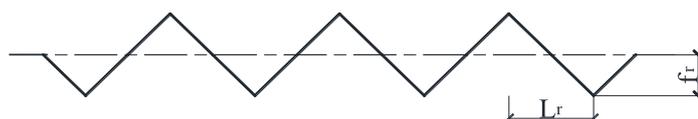


Рисунок 1 – Двутавровая балка с поперечно–гофрированной стенкой с гофрами треугольного очертания: L_r – длина полуволны гофра; f_r – высота полуволны гофра

– балки с гофрами трапециевидного и прямоугольного очертания применяют в США и Японии (рисунки 2 и 3);



Рисунок 2 – Двутавровая балка с поперечно–гофрированной стенкой с гофрами трапециевидного очертания: L_r – длина полуволны гофра; f_r – высота полуволны гофра

– балки с гофрами прямоугольного очертания:

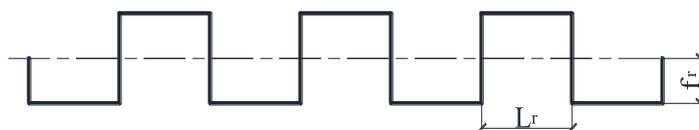


Рисунок 3 – Двутавровая балка с поперечно–гофрированной стенкой с гофрами прямоугольного очертания: L_r – длина полуволны гофра; f_r – высота полуволны гофра

– балки с гофрами волнистого очертания применяют в Европе (рисунок 4).

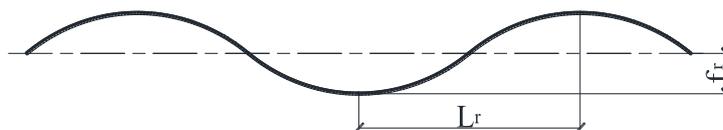


Рисунок 4 – Двутавровая балка с поперечно–гофрированной стенкой с гофрами волнистого очертания: L_r – длина полуволны гофра; f_r – высота полуволны гофра

1.1 История применения гофрированных конструкций

Еще до появления первобытных людей на планете природа диктовала свои правила выживания. Появились первые животные, млекопитающие и все другие живые существа. Но с момента зарождения первого живого существа прошло от 3.7 до 4.1 миллиардов лет.

Борьба за выживание – это один из движущих факторов развития, вместе с эволюционным процессом и наследственной изменчивостью. В виду данных факторов природа наделила многих живых организмов различными формами собственной защиты. Так, например, большинство моллюсков имеют специальные раковины, покрытые узкими радиальными ребрами.

С точки зрения биологов все элементы раковины имеют большое значение, ведь самые первые двустворки имели маленькие размеры, были гладкими и тонкостенными. Но затем эволюционное развитие привело не только к увеличению размеров, но и физическому изменению строения тела. Необходимо было прочностное увеличение раковины. Одни достигали этого путем утолщения стенок раковины, но это в свою очередь приводило к увеличению расхода материала и массы раковины, другие использовали более успешные методы увеличения прочности, например, увеличение кривизны створок. Третьи проделали то же действие, только за счет выработки радиальных складок – створок, например, имеющих радиальные ребра, которые расходятся от макушки к краям раковины.

Основное назначение этих ребер заключается, по–видимому, в увеличении прочности стенок раковины (рисунок 5).



Рисунок 5 – Многообразие вариантов ракушек с радиальными ребрами

Изучив строение моллюсков и, осознав все преимущества радиальных ребер (гофр) над гладкими и тонкостенными, люди с древности начали применять гофрированные конструкции при строительстве зданий и сооружений.

Гофрирование – процесс образования складок – (гофров) путем загиба листа в листовых материалах, через определенное расстояние, необходимое для улучшения характеристик материала: прочности и способности сопротивления образованию деформаций.

История развития гофрированных конструкций, в качестве несущих, берет свое начало с начала XVIII. Когда известный архитектор Стасов В.П. и конструктор Кларк М.Е., занимаясь восстановлением сгоревших деревянных перекрытий Зимнего дворца в г. Петроград, приняли при проектировании оригинальное решение, во-первых используя лист толщиной от 0,8 до 1,2 мм, а во-вторых применили трапециевидную форму гофрирования [6].

В 1898 г. Бубновым И.Г. была предложена система переборок (конструкций с гофрированной стенкой), выполненная в виде вертикальных пустотелых колонн чечевицеобразного сечения. Так испытания под давлением воды в 1901 г. на броненосцах типа «Бородино», конструкции которых были выполнены из гофрированной стенки, определили экономию металла по массе до 20%, а также прочность и жесткость. После начала использования сварочных работ в судостроении в конце 20-х – начале 30-х годов началось широкое использование переборок. Так в 1930 г. норвежской фирмой был запроектирован танкер для перевозки пищевых продуктов дедвейтом 1400 т., в 1931 г. в Гамбурге танкер «Mitra», в 1935 г. в Англии танкер «Miota». В судостроении использование прочных гофрированных переборок начали и на речных сухогрузных судах волжские судостроители. Так применение гофрированных конструкций, взамен плоских с набором уменьшило трудоемкость на 15%, снизило стоимость изготовления корпуса более чем на 10%, и сэкономило 11% металла [7].

В 1926 г. итальянским инженером А. Pierottet была предложена конструкция, которая была составлена из пластинок под углом 90°. Данная переборка способствовала уменьшению массы конструкции и увеличению полезной площади трюмов сухогрузных судов [8].

В 40-х годах начали использовать сварные переборки складчатого сечения и коробчатые с промежуточным набором, использовались и коробчатые клепаные.

Большое преимущество гофрированных переборок сказалось на выборе конструкций при проектировании и строительстве танкеров. По данным инженера Е.А. Новикова из общего числа танкеров, построенных в 1937–1939 гг. только 17% имели гофрированные переборки, уже в 1951–1952 гг. уже 39%, а в 1953–1954 гг. число танкеров составило 48%.

Первым в 1936 г. начавшим теоретические и экспериментальные исследования конструкций с гофрированными стенками был В.Н. Горнов. Он испытывал образцы балок с гофрированной стенкой из кровельного железа толщиной 5 мм, приваренной к стенке сплошным двусторонним швом толщиной 3–4 мм, нагруженные двумя сосредоточенными грузками в пролете. В результате эксперимента было установлено, что волнистая стенка практически не воспринимает нормальные напряжения, а рациональное распределение материала позволяет экономить расход материала до 2,5–3 раз.

Одним из главных производителей металлических гофрированных конструкций на территории Российской Федерации является ЗАО «Гофросталь» г. Москва, выпускающая все типы многолистовых металлических гофрированных конструкций (МКГ), принятых в международных практиках. Использование гофрированных конструкций вместо железобетонных конструкций обеспечивает экономию от 20 до 40%. При этом долговечность сооружений из МКГ составляет 80–100 лет. Конструкции могут применяться во всех климатических зонах страны [9].

В Европе конце 1950–х – начале 1960–х гофрированные конструкции с различными очертаниями гофров начинают использовать при строительстве мостов, эстакад и автострад. Например, в Японии в мостостроении гофрированные конструкции начали применяться с 1980 г, в Китае с начала 1990–х годов, а в Республике Казахстан с 2011 г.

В 2011 г. был сдан в эксплуатацию пешеходный мост шириной 2,7 м с общим пролетом 42,0 м, расположенный в г. Алматы на улице Восточная объездная. Две главные балки большепролетного моста высотой 1,4 м были выполнены из сварных двутавров типа «БГС–Казахстан», где поперечно-гофрированная стенка принята толщиной 8 мм (рисунок 6) [10].



Рисунок 6 – Мостовой переход
через автомобильную магистраль в г. Алматы

Например, в Японии более 50 мостов выполнено из конструкций с гофрированной стенкой [11,12]. Так, в 1993 г. первым однопролетным мостом длиной 31 м. и шириной 14,8 м был «Shinkai Bridge», поперечное сечение которого представляло собой коробчатую трапециевидную форму с железобетонными поясами.

Последний мост, построенный в Японии с использованием коробчатой балки с гофрированной стенкой, – это мост «Hontani (Motoya) Bridge» [13], который был построен в горной местности Такаваши–мура в 1998 году. Состоит из трех основных пролетов длиной: 44 м, 97,2 м и 55,9 м. Общая длина моста составляет 198,4 м. Мост «Hontani (Motoya) Bridge» предварительно напряжен отклоненными кабелями, которые встроены в коробчатую балку.

Использование при строительстве моста «Kurobegawa Bridge» гофрированных стенок в 2004 г. позволило построить первый в мире мост для железной дороги общей длиной 761 м, где 344 м выполнены из гофрированных стенок. А Мост «Himiyume bridge» [14, 15], проект которого был разработан еще в 1988 году, но построен лишь в 2004 г., был выполнен в трапецеидальном очертании с гофрированными стенками общей длиной 365 м, где центральный пролет составил 180 м и считался самым длинным мостов подобного класса.

Всемирно известный подвесной мост «Yahagigawa bridge» [16], построенный в 2005 г. общей длиной 820 м и шириной моста 43,8 м, и является одним из наиболее широких в Японии. Отличается коробчатым сечением, пояса которого выполнены из железобетонных элементов, имеет семь гофрированных стенок трапециевидного очертания.

Также в Японии с применением гофрированных стенок были построены следующие мосты: в 2005 г. «Katsurashima Viaduct», в 2006 г. «Kinugawa Bridge», «Ritto Bridge» [17, 18], «Shigaraki 7th Bridge» [19].

В Китае очень популярно строительство мостов из конструкций с гофрированными стенками. Активное строительство мостов началось в начале 90–х годов конца XX века [20,21].

Мост «Móra Ferenc Tisza bridge», построенный в 2011 г. в Венгрии через реку Тиса, выполнен из гофрированных стенок и предварительно напряженной нижней плитой общей длиной 661,2 м и шириной 29,94 м [22].

Область применения металлических гофрированных конструкций на территории Республики Казахстан очень велика. Построено более 300 зданий и сооружений с использованием сварных двутавровых балок с гофрами треугольного очертания типа «БГС–Казахстан» и «Алма–Ата».

В конце 80 годов прошлого столетия ученым Казахского ЦНИИПСК, экспериментально исследовавших действительную работу сварных двутавровых балок с гофрами треугольного очертания, удалось доказать возможность их применения в сейсмически опасных районах. В 1981 г. балки с гофрированной стенкой были применены при строительстве многоэтажного административного здания в г. Алма–Ата в качестве ригеля каркаса. При строительстве многоэтажных зданий подобные конструкции были использованы впервые [23].

С 1981 по 1990 гг. Казахским отделением ЦНИИПроектстальконструкция после положительной оценки Госстроя СССР о конструктивных формах систем

покрытий «Алма–Ата» началось их массовое внедрение в проектирование и строительство. В те годы было запроектировано более 140 объектов, где были применены стропильные, подстропильные балки и прогоны системы «Алма–Ата», общей площадью около 1000,0 тыс. м² общей массой более 20,0 тыс. тонн [23 с.8].

Среди построенных объектов также был цех в Карагандинской области общей площадью около 50,0 тыс. м² (рисунок 7), при строительстве которого были применены балки с гофрированной стенкой системы «Алма–Ата» пролетом 24 м, высотой стенки 1400 мм и толщиной стенки 4,0 мм. Общий шаг балок составлял 12 м. А также был построен завод крупнопанельного домостроения в Алматинской области (рисунок 8) общей площадью около 56,0 тыс. м². Были использованы балки длиной 24 м, высотой 1,2 м и толщиной стенок 3,0 мм. Шаг балок составил 4,0 м [23 с.73].



Рисунок 7 – Производственный корпус завода в Карагандинской области [23 с.80].



Рисунок 8 – Покрытие производственного здания завода крупнопанельного домостроения в Алматинской области [23 с.80].

В Казахстане при проектировании современных стальных сейсмостойких уникальных конструкций применяются двутавры с гофрированной стенкой. Сотрудниками ТОО «Институт Проектстальконструкция» в г. Алматы (Казахстан) был разработан проект двух уникальных большепролетных покрытий зданий Ледовой Арены для проведения спортивных соревнований на всемирной универсиаде в 2017 г. [24].

В зарубежной практике, начиная в 70–80–х годов прошлого столетия, при строительстве зданий и сооружений конструкции с гофрированными стенками имели большую популярность [25].

Применять металлические конструкции с гофрированной стенкой в Швеции в 70–х годах начали такие фирмы, как «AB Olwerken» и «AB Ranawerken» изготавливали трапецидальные гофрированные балки, высотой от 0,4 м до 1,5 м [26].

Популярная австрийская фирма «Zeman» начала производить балки с волнистой гофрированной стенкой, при помощи полностью автоматизированной линии по производству сварных двутавровых Sin–балок с полным компьютерным контролем технологического процесса [27].

1.2 Экспериментально–теоретические исследования металлических конструкций с гофрированной стенкой на территории Республики Казахстан и за рубежом

В 1972 г. в Пензенском ИСИ под руководством Е.И. Белени создали стенд, на котором испытывали на выносливость подкрановые балки, имитирующие работу мостовых кранов тяжелого режима [28]. Первыми испытание проходили балки традиционного сечения из стали ВСтЗпс5 (С255) с поперечными ребрами жесткости до 2 млн циклов загрузений.

В 1970 г. были проведены экспериментальные исследования [29] двух сварных алюминиевых балок с плоской и волнистой стенками. Высота по отношению к толщине принята в первом случае 83, а во втором 167. Всего испытано: одна балка с плоской стенкой и пять балок с гофрированной стенкой. Основные прогибы конструкции в плоскости стенки и поясов измерялись при помощи прогибомеров Максимова, а тензодатчики сопротивления использовались для измерения относительных деформаций двух поперечных сечений.

На кафедре строительных конструкций Уральского политехнического института им. С.М. Кирова с 1968 г. проводятся исследования и испытания балок с гофрированной стенкой на чистый и поперечный изгиб, кручение и изгиб с кручением [30].

Была рассмотрена составная система из гофрированной стенки и сопряженных с ней поясов. Поставленная задача о напряженном состоянии стенки была решена методом теории упругости анизотропных пластинок [31].

Данные испытаний подтвердили правильность расчетных формул проверки устойчивости стенки и отражают действительную работу балки.

Критическое напряжение продольного гофра сжатия, определяется по формуле (1):

$$G_1^{кр} = 1,8E \cdot (\delta/Kl)^2, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала стенки.

Зависимость прогиба от угла наклона гофра была описана эмпирической формулой (2):

$$y_{гофр} = y_{об} + \frac{Q_{срх}}{G \cdot F_{ст}} \left[1 + \frac{f^2}{2l\delta} \left(1 - \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right) ctg^2 \alpha \right], \quad (2)$$

где $y_{гофр}$ и $y_{об}$ – соответственно прогибы гофрированной и обычной балок одинаковой жесткости (EJ).

Испытываемые балки потеряли местную устойчивость сжатого пояса в середине пролета, исчерпав несущую способность. Восходящий гофр, который проходил через линию пересечения опорного ребра и нижнего пояса, разрушился первым. После специального усиления балок специальными фигурными ребрами они были разрушены от продавливания средней части, расположенной между сосредоточенными силами. Местное напряжение под сосредоточенной

нагрузкой экспериментально исследовалось на 6 вертикально–гофрированных балках, выполненных из стали ВСт3 (С235) с пролетом 3 м [32].

Следующим интересным вопросом в испытаниях был вопрос о работе балок гофрированными стенками на местные сосредоточенные нагрузки. Задача о местных напряжениях была решена конечно–разностным методом. Хорошие результаты показал способ последовательной релаксации [33].

В 1984 г. было проведено экспериментальное исследование Кудрявцева В.А. [34], цель которого заключалась в проверке применимости теории упругости гофрированных пластин к характеристике устойчивости анизотропных пластин. Рассматривались устойчивость первого рода при сдвиге и изгибе [35], а также напряженно–деформированное состояние с учетом прогибов.

Объектом экспериментального исследования на сдвиг стали отсеки из гофрированных пластин с различными сторонами, граничными условиями. Пролет 4 м, высота 0,411 м [36], сталь марки Ст3пс5 (С245). Были изготовлены отсеки с гофрами трапецевидной формы в количестве 6 двутавровых балок. Опорные части отсеков были выполнены из гофрированного профиля $757 \times 20 \times 1,4$.

В общем, исследования показали эффективность работы гофрированных пластин на общий сдвиг и изгиб.

Степаненко А.Н. в 2001 г. была выполнена работа [37], в которой обозначены испытания трех экспериментальных образцов (Ф–1, Ф–2, Ф–3) в четыре этапа [38, 39].

Приложение нагрузки выполнялось как с эксцентриситетом от 10 до 30мм, так и без него. Максимальная нагрузка принималась не более несущей способности одного пояса образца при его сжатии или растяжении и определялась по формуле 3:

$$P_{ис} = 0,8 \cdot b \cdot t_f \cdot h \cdot R_y / l_0, \quad (3)$$

где 0,8– коэффициент понижения испытательной нагрузки;

R_y –7 кН/см²– расчетное сопротивление алюминиевого сплава АМг–2М;

l_0 – расстояние между опорным сечением фрагмента и ближайшей к нему приложенной силы, равной 1,2м.

Основными результатами экспериментальных исследований трех образцов на поперечный и чистый изгиб стали:

1) волнистая гофрированная стенка, практически по большей части своей высоты (92...95%) не воспринимает нормальных напряжений, при любом отклонении в пределах высоты гофра от оси стержня, что подтверждает исключение стенки из работы на нормальные напряжения [40];

2) для всех испытываемых образцов разница максимальных теоретических вертикальных прогибов от полученных на натуральных испытаниях равна $f_{т,макс} = 1,05f_{э,макс}$, что дает возможность определения прогиба при изгибе [41] по формуле (4):

$$f_{max} = f_m + f_Q = \frac{M^H \cdot L^2}{10 \cdot E \cdot J_f} + \frac{M^H}{G \cdot h_w \cdot t_w \cdot k_s}, \quad (4)$$

3) даже при практическом совпадении средних результатов теоретических касательных напряжений со средними результатами натуральных испытаний, необходимо учитывать наличие экстремальных теоретических величин, которые превышают до 20% в средней точке высоты стенке и до 35% в крайних точках среднее теоретическое значение.

В зарубежных источниках приводится немало примеров испытаний гофрированных стенок балок на сдвиг, однако большинство из них было проведено на мелкомасштабных моделях, размеры которых были меньше их натуральных величин [42,43]. Хорошим примером, натуральных испытаний можно считать испытания двух мостовых балок с гофрированной стенкой трапециевидного профиля, выполненные в 2002 и 2006 гг. Аббас Х.Х., Драйвер Р.Г., Саус Р. [44]. Данные балки были запроектированы по ранее установленным критериям [45].

В 2007 г. Кучта К.Р. в своей работе [46], а позже в работе [47] опубликовал данные теоретических и экспериментальных исследований балки с гофрированной стенкой, где сделано предположение о том, что предельная прочность балки зависит от ширины приложения нагрузки.

В 2008 г. Абу Хасан М.Н. с коллективом авторов опубликовал свою работу [48] в которой, на основании ранее опубликованных работ [49 – 53], описываются испытания балки с гофрированной стенкой трапециевидного очертания с различной толщиной стенки.

В 2008 г. на кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ Кретиным А.Н. были проведены натурные испытания 4-х образцов балок [54].

В том же 2008 г., только в г. Москва Рыбкин И.С. [55], исследовав особенности тонкостенных гофрированных конструкций, предложил новый комбинированный вид двутавровых конструкций с переменным гофрированием.

В работе [56], Кавесди Б. и Дунаи Л. 2010 г. сказано, что экспериментальные испытания балок с гофрированной стенкой трапециевидного очертания в Швеции начали проводиться в 1987 г. коллективом ученых [57]. Было проведено шесть экспериментальных исследований. В 1988 г. было проведено также около шести испытаний балок, внимание уделялось анализу толщины стенок, длины и высоты балки [58]. Итогом стал анализ работы балок, их устойчивости и сравнение теоретических и экспериментальных данных. Было выявлено, что причиной ранних разрушений некоторых моделей были не точно принятые конструктивные размеры и коэффициенты масштабирования.

В 2010 г. [59] Егоров П.И. в своей работе исследовал напряженно-деформированное состояние балок и колонн с гофрированной стенкой. Аналитически описывает напряженное состояние гофров треугольного и трапециевидного профилей, предложены универсальные уравнения, определяющие усилия от действия изгибающего момента. Выведено подтверждение методики Степаненко А.Н. [60]. Численные эксперименты, подтверждают использован-

ные результаты напряженно-деформированного состояния (НДС) гофрированных стержней, полученных при натуральных испытаниях.

Кудрявцев С.В [61] (2011 г.) в своей работе изучил работу балки с гофрированной стенкой, ослабленной круглыми отверстиями, исследовал ослабление несущей способности стенки. Получил инженерные формулы, определяющие коэффициенты концентрации напряжений, а также предложил методику оценки прочности, устойчивости и жесткости данных балок.

В своей работе Мартинс А.Г. [62] аналитически и экспериментально исследовал три композитных соединения в крестообразном положении, где стенка балки выполнена из гофрированной стали синусоидального очертания, а полки выполнены из железобетона. С целью проверки опубликованных ранее работ [63 – 65] было проведено полномасштабный эксперимент. Мартинс А.Г. пришел к общему выводу, что данные численных и натуральных испытаний во всех работах схожи.

В 2013 г. Аденилциа Ф.Г. Цалензани с коллективом авторов опубликовал работу [66] о вращательной жесткости композитных гофрированных балок с гофрами синусоидального профиля на боковой изгиб с кручением. В целом было проведено четыре экспериментальных испытания, а теоретические испытания, проведенные при помощи программы ANSYS 9.0, исследовали шестьдесят восемь моделей. В результате были предложены формулы для определения изучаемых жесткостей.

В 2013 г. Полторацнев А.С. в своей работе [67], исследуя несущую способность и оптимизацию балок с гофрированной стенкой, подтверждает эффективность использования в балках вместо традиционной для стальных конструкций плоской стенки гофрированную стенку. Он предложил использовать балки с гофрированной стенкой на опорах, а с плоской стенкой – в середине пролета, уменьшая при этом общую массу до 20%. По методике Я.М. Лихтарникова [68], определил заводскую себестоимость конструкций применимо к гофрированным конструкциям, при этом оценивался класс стали, гибкость стенки, высота балки, размер и форма гофров, трудоемкость и себестоимость тонкостенных балок.

Серьезно к исследованию напряженно деформированного состояния балок с гофрированной стенкой волнистого очертания в 1961 г. подошел Ажермачев Г.А. [69,70], испытывая балки размером 1200 мм, поперечное сечение 4×80 мм, стенки 200 мм, высота волны 20 мм, длина волны 160 мм. НДС определялось методом лакового покрытия толщиной 0,2÷0,3 мм, с чувствительностью $\varepsilon=(0,5\div 2)\cdot 10^4$, это соответствовало появлению первых трещин в стенке при напряжении σ равном 10÷40 Мпа. Испытания проводились на изгиб, кручение и изгиб с кручением. По результатам проведенных испытаний было выявлено, что по сравнению с плоской стенкой, гофрированная стенка обладает большей жесткостью и несущей способностью, а также снижена металлоемкость.

Критическая величина местного напряжения в стенке определялась, исходя из методики Папковича П.Ф., по формуле (5):

$$P_{cr} = 0.605 \cdot \frac{E \cdot t_w^2}{r_r}, \quad (5)$$

где r_r – радиус кривизны полугофра;

E – модуль упругости материала.

А для определения критических касательных напряжений, был использован принцип теории анизотропных пластин Е. Зейделя, определяемый по формуле (6):

$$\tau_{cr} = \frac{E \cdot f^{3/2} \cdot t_w^{1/2}}{0.172 \cdot h_w^2}, \quad (6)$$

где рекомендуемая минимальная толщина волнистой стенки балки определяется по формуле (7):

$$t_w = 0.03 \cdot \frac{h^4 \cdot \tau^2}{E^2 \cdot f_r^3}, \quad (7)$$

где f_r – высота полуволны гофра;

h – высота стенки.

В данных конкретных исследованиях применялись модели конструкций, имеющих стенки как с гофрами треугольного очертания, так и плоскими стенками в зависимости от поставленных целей [71, 72].

Таким образом при проектировании более эффективным является использование балок с гофрированной стенкой, для изготовления которых расходуется меньше стали, при этом уменьшается собственный вес конструкции и не увеличивается строительная высота здания [73].

1.2.1 Анализ результатов испытаний стенки двутавровой балки на прочность

В 1976–1980 годах были проведены испытания балки на сдвиг, так при действии касательных напряжений гофрированные стенки имеют преимущество над плоскими стенками. Было изучено напряженно–деформированное состояние 24 моделей с двумя гибкостями, для десяти вариантов высоты и длины гофра, а также на моделях с плоской стенкой [23 с.39].

Основные результаты испытаний:

1. Работа гофрированной стенки во всех случаях на восприятие касательного напряжения τ_{xy}^3 практически одинакова по всей высоте и не зависит от параметров гофров, но параметры гофров оказывают влияние на характер распределения и восприятия нормальных напряжений σ_x^3 ;

2. Данные, полученные путем компьютерного моделирования, используя МКЭ, согласовываются с величинами эксперимента с надежностью 0,99.

3. В зависимости от параметров гофров несущая способность гофрированных стенок доходит до 55% несущей способности аналогичной по толщине плоской стенки и при малой гибкости $\lambda_w \leq 120$ расход металла снижается до 7%.

4. Необходимость расчета по второму предельному состоянию обусловлена величиной деформативности гофрированной стенки (до 10% больше) по отношению к деформативности плоских стенок.

1.2.2 Анализ результатов испытаний стенки двутавровой балки на устойчивость

Формы истощения несущей способности моделей определялись во второй части эксперимента, в которой испытываемые модели доводились до разрушения.

Было определено, что по длине нескольких волн теряется общая устойчивость гофрированных стенок (рисунок 9), а это идентично тому, что происходит и в плоских стенках (рисунок 10) при равной толщине металла.

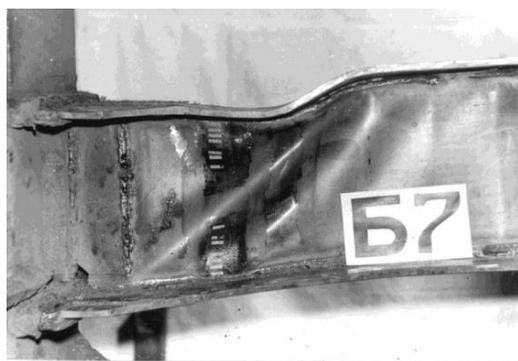


Рисунок 9 – Потеря общей устойчивости гофрированной стенки [23 с. 42]

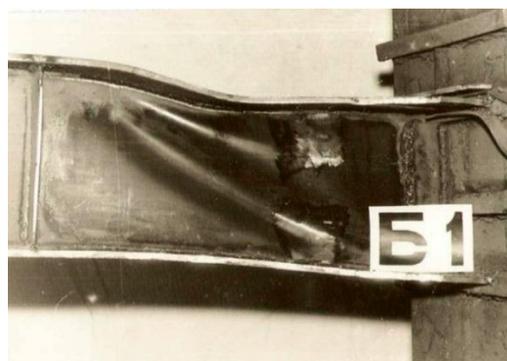


Рисунок 10 – Потеря общей устойчивости плоской стенки такой же толщины [23 с. 42]

При работе стали за пределом упругости наступала потеря местной устойчивости некоторых гофров, с последующим сдвигом сжатого пояса (рисунок 11), также сдвиг сжатого пояса без деформации гофрированной стенки балки (рисунок 12).



Рисунок 11 – Потеря местной устойчивости отдельных плоскостей гофров со сдвигом сжатого пояса [23 с.43]

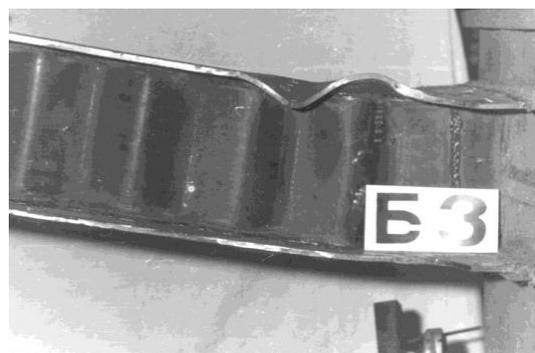


Рисунок 12 – Потеря местной устойчивости сжатого пояса моделей с гофрированными стенками [23 с.43]

По результатам проведенных испытаний были сделаны выводы, что эффективность применения гофрированной стенки, достигается в случае, когда потерей местной устойчивости стенки определяется ее несущая способность и

неэффективность в случае определения несущей способности потерей местной устойчивости сжатого пояса.

1.2.3 Испытание стенки двутавровой балки, ослабленной отверстиями на устойчивость

При строительстве зданий и сооружений, в том числе большепролетных, нередко возникает необходимость пропуска различного оборудования в пределах строительной высоты балки или фермы. Так, при проектировании объектов, возникла необходимость проектирования балок с гофрированной стенкой с отверстиями, имеющими различный диаметр. Но ввиду отсутствия данных о характере реальной работы гофрированных стенок балок с отверстиями, критических напряжениях, их устойчивости и т.д. вызвало необходимость в проведении исследований балок с различными отверстиями и методами их укрепления и усиления.

Проведенные испытания [23 с.44] дали положительные результаты, из которых можно сделать следующие выводы:

- 1) при использовании полуавтоматической сварки в заводских условиях достаточна односторонняя проварка гофрированной стенки толщиной 5 мм и меньше;
- 2) при использовании гофрированной стенки балки с гибкостью более 300 достигается высокая эффективность, широкий диапазон использования и высокая надежность;
- 3) доказано соответствие полученных теоретических и экспериментальных данных и принципа работы заложенного в методику расчёта и конструирования.

1.3 Технология изготовления и монтажа элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой систем «Алма–Ата» и «БГС–Казахстан»

На территории нашей республики впервые методика гофрирования конструкций была осуществлена на заводах по производству металлических конструкций в 1981 г. Для уменьшения трудозатрат по изготовлению все операции по гофрированию осуществлялись только при помощи вертикальных гидравлических прессов. С целью повышения производительности стали использовать загибочный станок ротационного типа, разработанный коллективом в лице Максимова Ю.С., Острикова Г.М., Ибраимова Н.Э.

Основные конструктивные формы начали полномасштабное внедрение после тщательно изученных особенностей процесса изготовления, технологии транспортирования и монтажа, позволивших раскрыть все их достоинства [74, 75].

Балки систем типа «Алма–Ата» и «БГС–Казахстан» для покрытий обеспечили компактность и унификацию, высокую технологичность и производительность при производстве монтажных работ.

Основные технологические операции по изготовлению сварных двутавров с продольно– или поперечно–гофрированными стенками в системах типа «Алма–Ата» и «БГС–Казахстан» представлены в [23 с.63]:

В Казахстане на многих заводах по изготовлению тонкостенных металлических конструкций была освоена технология производства сварных двутавровых элементов с гофрированными стенками систем «Алма–Ата» и «БГС–Казахстан», так как данная технология не требует специального дорогостоящего оборудования и является несложным, по сути, процессом.

Так, начиная с 1995 г., производство гофрированных двутавров со стенками высотой от 120 мм до 650 мм выполнялось в соответствии техническим условиям [76]. Сейчас работы по изготовлению и монтажу металлических строительных конструкций из сварных двутавровых профилей с гофрированными стенками осуществляется согласно [77 – 79].

В последнее время проведением теоретических и экспериментальных работы занимались ученые разных стран [80 – 98], и все исследования были направлены на поиск и усовершенствование конструктивных решений балок с гофрированными стенками различной формы гофров.

Выводы по 1 разделу

1. До появления человечества природа сформировала собственные правила выживания и формы защиты различных живых организмов, например, моллюсков, имеющих радиальные ребра на раковинах, для увеличения прочности стенок.

Таким образом, гофрирование, образование складок, путем загиба листовых материалов, это древняя форма, служившая защитой для живых организмов, а при строительстве способ увеличения прочности и надежности зданий и сооружений.

2. В конце 18 века гофрированные конструкции, так называемые переборки, начинают применяться в судостроении, а в конце 1920–х годов, после начала использования сварочных работ, находят широкое применение в данной отрасли.

3. Широкое применение гофрированных конструкций обеспечили их достоинства, а именно: наряду с меньшей деформативностью они обладают большей изгибно–крутильной жесткостью, а также меньшим весом по сравнению с гладкостенными конструкциями; эффективны в использовании при длительном статическом нагружении и воспринимают значительные изгибающие нагрузки; при замене ферм на гофрированную балку возможна экономия строительной высоты здания и, соответственно, затраты на обогрев здания, снижаются затраты на монтажные и транспортные затраты, сокращаются сроки на проектирование, поставку и монтаж и т. д.

4. Начиная 1950–х годов, гофрированные конструкции с различными очертаниями гофров находят свое широкое применение при строительстве мостов, эстакад, автострад как в Европе, так и в Америке. В Японии, в мостостроении гофрированные конструкции начали применяться только с 1980 года, но при этом построено более 50 мостов. Китай активно начал использовать гофрированные конструкции, начиная с 1990–х годов. А вот на территории Республики Казахстан с первый мост был сдан в эксплуатацию 2011 г. На сегодняшний день построено более 10 мостов с применением гофрированных конструкций.

5. В настоящее время гофрированные конструкции широко применяются во всем мире при строительстве зданий жилого, производственного и админи-

стративного назначения. В нашей республике уже более 40 лет при строительстве зданий и сооружений применяют сварные двутавровые балки и колонны с гофрами треугольного очертания «БГС–Казахстан», а, начиная с конца 90–х годов прошлого столетия, начали использовать «Sin-beam» – сварную двутавровую балку с гофрами синусоидального очертания. Область применения металлических гофрированных конструкций на территории Республики Казахстан очень велика и построено более 300 зданий и сооружений с использованием сварных двутавровых балок с гофрами треугольного очертания типа «БГС–Казахстан» и «Алма–Ата».

6. На территории Казахстана наиболее популярным являются гофры треугольного очертания. Так, например, в странах Европы используют волнистую форму гофров, а в Японии и США – трапециевидную и прямоугольную.

7. По проведенному анализу экспериментальных и теоретических исследований металлических конструкций с гофрированной стенкой за рубежом и на территории Республики Казахстан можно сделать следующие выводы, что основные исследования проводятся в балках с поперечно–гофрированной стенкой как треугольного, так трапециевидного и волнистого очертания гофра.

8. В основном пользуются теорией анизотропных пластин и уравнением теории упругости для определения и описания НДС в конструкциях.

9. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями, требует тщательной проработки напряженно–деформированного состояния для обеспечения прочности, устойчивости и долговечности строительных конструкций.

10. Неотъемлемым путем увеличения эффективности, экономичности и надежности металлических конструкций служит внедрение в процесс проектирования, производства и строительства, новых технологий, направленных на рациональное использование строительных конструкций. А создание новых конструктивных форм, оптимизация и усовершенствование имеющихся конструкций металлических конструкций, безусловно, является частью научно–технического прогресса.

11. Работы по исследованию влияния отверстий в стенках гофрированных балок при изгибе на их несущую способность имеются в ограниченном количестве. Исследования влияния отверстий в стенках гофрированных балок на концентрацию напряжений близи данных отверстий и на прогиб балок проводятся также в ограниченном количестве.

12. Для повсеместного внедрения гофрированных конструкций в строительство зданий и сооружений на территории Республики Казахстан необходимо проведение полномасштабных теоретических и экспериментальных исследований балок с гофрированной стенкой, в том числе ослабленных отверстиями.

13. Необходима разработка и исследование новых типов металлических балок с гофрированной стенкой, ослабленных отверстиями, а также совершенствование имеющихся конструктивных решений подкрепления отверстий, поиск оптимального диаметра и шага отверстия по длине и высоте гофрированной стенки.

2 ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГОФРИРОВАННЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЯМИ

2.1 Общие положения

Гофрированные конструкции нашли широкое применение в кораблестроении в конце XIX и начале XX вв., а в 30–е гг. – в авиастроении.

В соответствии с исследованиями [99,100] работа балки с поперечно гофрированной делится на четыре стадии: докритическая работа, закритическая работа, упругопластическая работа и потеря несущей способности.

Область использования гофрированных конструкций обширна: они используются в качестве несущих конструкций балок перекрытий и покрытий в жилых, общественных, административных и производственных зданиях [101 – 105].

Факторы, влияющие на несущую способность балки с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями:

- 1) расположение отверстие в балке, относительно ее наиболее опасных мест концентрации напряжений (например, в приопорных участках);
- 2) шаг отверстий в стенке балки;
- 3) очертание отверстия (например, квадратное, прямоугольное или наиболее распространенное круглое отверстие);
- 4) гибкость стенки;
- 5) центр отверстия относительно высоты стенки.

С целью определения существующих конструктивных решений отверстий был найден ряд балок, ослабленных различными формами и размерами отверстий [106 – 112].

2.2 Теоретические и экспериментальные исследования гофрированных двутавровых балок, ослабленных отверстиями

Необходимость применения в гофрированных стенках отверстий обусловлена тем, что в соответствии эксплуатационным требованиям необходима прокладка системы трубопроводов различного назначения: водопровод, отопление, вентиляция, кондиционирование и т. д.

Каждое отверстие имеет свою технологию выполнения. Так, например, маленькое отверстие может быть просверлено или прожжено. Данная операция может выполняться как на заводе–изготовителе, так и на строительной площадке. Выполнение отверстий большого диаметра требуют более тщательного подхода к их выполнению, потому что они ослабляют общую несущую способность гофрированной стенки балки на срез, за счет уменьшения поперечного сечения стенки, но при этом при чистом изгибе несущая способность стенки менее подвержена ослаблению. Поэтому расположение отверстий необходимо выбирать в тех местах стенки, где наименьшая концентрация напряжений от поперечных сил, т.е. ближе к середине пролета балки.

Задачи по влиянию отверстий на работу стенки балки, которые осуществляется по принципу Виренделя или четырехугольного изгиба, исследуются в различных работах [113 – 122].

2.2.1 Концентрация напряжений вблизи круговых отверстий в гофрированной стенке балки

Огромное значение имеет исследование по влиянию отверстий на распределение напряжений в различных участках стенки балки. В практике круглые отверстия рассматривают как уменьшение площади поперечного сечения.

Концентрация напряжений, характеризующаяся коэффициентами концентрации, проблема и спутник любого конструктора и проектировщика, постоянно стремящегося минимизировать местные напряжения [123].

Концентрацией напряжений принято считать отношение местного напряжения к среднему или какому-либо другому, которое помогает определять условия возникновения повреждений.

Коэффициент интенсивности напряжений, мера напряженности материала в зоне концентрации большого напряжения или трещины. Коэффициент интенсивности напряжений также определяет возможность разрушения и скорость увеличения концентрации напряжений или роста трещин.

В 1928 г. Туцци [124] провел сравнительный анализ распределения напряжений между опытными данными по влиянию круглого отверстия с центром на нейтральной оси балки под действием изгибающего момента и результатами теории распределения напряжений.

А в 1936 г. Кокер в своей работе [125] проводил исследования по распределению напряжений в растянутой пластине с одним или несколькими отверстиями. Он исследовал действие неуравновешенных сил, приложенных к контуру отверстия в пластинке.

2.2.2 Конструктивные решения по усилению круглых отверстий поперечно-гофрированной стенки балки

Усиление стенки вблизи отверстий, т.е. утолщение вокруг отверстий или окантовка отверстий имеет несколько основных целей:

1) уменьшение концентрации напряжений за счет увеличения площади поперечного сечения;

2) сохранение номинального напряжения в стенке с отверстием.

Сохранение номинального напряжения – это, в своем роде, компенсация отверстий, т.е. потерянной площади гофрированной пластины. Так как повышения напряжения происходит по контуру отверстия, поэтому утолщения только части стенки в области отверстия не дадут желаемого результата, т.е. не компенсируют отверстие и в зоне изменения толщины появятся дополнительные напряжения по данным исследований Кокера [125].

Для предотвращения появления трещин в балках с гофрированной стенкой вблизи зон с концентрацией напряжений в круглых отверстиях следует выполнять их подкрепление. Так как в случае действия больших нагрузок, способных вызвать разрушение конструкции, происходит превышение предела текучести материала в области отверстий. Подкрепление отверстий выполняют различными способами. Например, по нормативным данным СНиП РК 5.04–23–2002 –

Стальные конструкции [126] необходима установка пары ребер жесткости с двух сторон отверстия (рисунок 13).

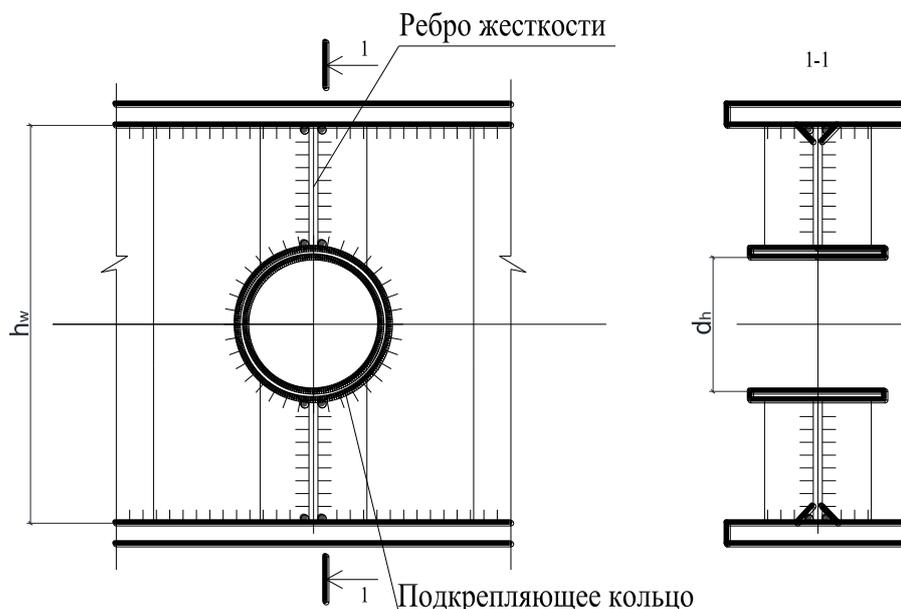


Рисунок 13 – Схема усиления круглых отверстий

При усилении отверстий необходимо выполнение условий:

1. Ширина ребра жесткости определяется по формуле (8):

$$b_h \geq \frac{h_w}{30} + 40\text{мм}, \quad (8)$$

где h_w – высота стенки;

2. Толщина ребра жесткости определяется по формуле (9):

$$t_h \geq 2 \cdot b_h \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (9)$$

где h_w – высота стенки; b_h – ширина выступающей части ребра; R_y – расчетное сопротивление стали; E – модуль упругости стали.

3. Площадь окаймления.

Площадь листовой стали подкрепляющего окаймления должна быть не меньше общей площади отверстия.

В данной работе усиление отверстий рассматриваются по условиям, указанным выше. В научных трудах, доступных в печати, отсутствуют требования теоретических и экспериментальных исследований, о влиянии усиленных отверстий на несущую способность балки с поперечного гофрированной стенкой. Поэтому, вопрос об усилении отверстий требует отдельного внимания и дальнейших исследований.

2.3 Основные положения расчета балок с гофрированной стенкой в нормативных казахстанских и зарубежных документах

2.3.1 Современное положение строительных норм на территории Республики Казахстан

На территории Республики Казахстан, в рамках национальной программы «100 конкретных шагов», а также лично по поручению главы нашего государства Нурсултана Абишевича Назарбаева было поручено перейти от старой системы СНиП и ГОСО к новой системе Еврокодов.

Система Еврокодов представляет собой базу стандартов Европы (EN), которую используют при проектировании как зданий и сооружений, так и продукции строительного характера. Данную систему разработала европейская организация по стандартизации СЕН. Она включает в себя обширную область по проектированию конструкций (нагрузки, воздействия, пожары, землетрясения, геотехническое проектирование конструкций и т.д.), основные типы конструкций зданий, мостов, башен, мачт и т.д., а также основные строительные материалы (сталь, дерево, бетон, кирпич, камень, алюминий и др.).

Министерство национальной экономики совместно с ведущими проектными организациями разработали переход на строительные нормы и правила, которые основаны на Европейских нормах проектирования (Еврокодах).

Нормативная база строительной сферы была реформирована согласно новой концепции, состоящей из следующих этапов:

Этап №1. Было разработано 58 частей норм строительства СН РК EN 1990–1999, которые соответствовали Европейским нормам с национальными приложениями и учли природу и климат нашей территории. В действия Еврокоды вступили с 1 июля 2015 г.

Этап №2. Данный этап начал свою работу в 2015 г. и по плану закончится в 2019 г. За данное время трансформировалась существующая нормативная база в соответствии с новой системой технического регулирования, осуществлялась подготовка специалистов и проводилась апробация новых норм на практике.

Этап №3. В 2020 г., дана оценка по применению Еврокодов, итогом которой стал полный переход на Еврокоды, что в будущем приведет к полномасштабному внедрению на территории всей республики мировых стандартов, повысит эффективность современных проектных решений, позволит использовать современные технологии и строительные материалы, а в целом повысит надежность и долговечность строительных конструкций.

2.3.1.1 Расчет гофрированных стенок и полок двутаврового сечения на местную и общую устойчивость

В казахстанских нормативных документах, включая СНиП РК5.04–23–2002, а также, говорится, что для увеличения устойчивости и уменьшения массы конструкций в балках следует использовать поперечно–гофрированную стенку по отношению к продольной оси балки, проверяя при этом местную и общую устойчивость [127] прямоугольных отсеков гофрированной стенки балки. Расчетные параметры проверяемой стенки – это ширина панели гофра, шаг

гофра, радиус закругления, расчетная высота стенки, равная полной высоте, а также толщина стенки, соответственно ($b_w, \alpha, R, h_{ef} = h_w, t_w$).

Устойчивость поперечно-гофрированных стенок проверяют по формуле (10):

$$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w \cdot t_w \cdot \gamma_{wc}}, \quad (10)$$

где $\tau_{xy,max}$ – касательное напряжение в стенке (максимальное) от расчетной нагрузки;

Q_{max} – поперечная сила в балке (максимальная);

$\gamma_{wc} = 0,9$ – коэффициент условия работы на срез балки с поперечно-гофрированной стенкой.

При расчете местной устойчивости в случае, когда локальное напряжение $\sigma_{loc} = 0$, применяют формулу (11):

$$\tau_{xy,max} / \tau_{p,cr} \leq \gamma_c, \quad (11)$$

где $\tau_{p,cr}$ – критическое касательное напряжение местной потери устойчивости.

Критическое касательное напряжение потери местной устойчивости для треугольного очертания гофров может быть определено по формуле (12):

$$\tau_{p,cr} = \frac{1,12 C_{p,cr} R_s}{\lambda_c^2}, \quad (12)$$

где $C_{p,cr}$ – отношение высоты стенки и ширины панели гофра, коэффициент принимается по таблице 3.1 [23 с. 30];

λ_c – условная гибкость панели гофра, определяемая по формуле (13):

$$\lambda_c = \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (13)$$

При расчете общей устойчивости в случае, когда локальное напряжение $\sigma_{loc} = 0$, применяют формулу (14):

$$\tau_{xy,max} / \tau_{o,cr} \leq \gamma_c, \quad (14)$$

где $\tau_{o,cr}$ – критическое касательное напряжение общей потери устойчивости.

Критическое касательное напряжение потери общей устойчивости для треугольного очертания гофров может быть определено по формуле (15):

$$\tau_{o,cr} = \frac{1,12 C_{o,cr} R_s}{\lambda_w^2}, \quad (15)$$

где $\bar{\lambda}_w$ – условная гибкость поперечно–гофрированной стенки, определяемая по формуле (16):

$$\lambda_w = \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (16)$$

$C_{o,cr}$ – отношение параметров (b_w и f), коэффициент определяется по формуле (17):

$$C_{o,cr} = 5,34 + (5,5 \cdot \beta^2 - 0,6) \cdot \sqrt[3]{\frac{\gamma}{4(7 \cdot \beta^2 - 5)}}, \quad (17)$$

где $\beta = h_w/b_w$ – отношение высоты гофрированной стенки к ширине панели гофра;

$\gamma = 0,91 \left(\frac{f}{t_w}\right)^2$ – отношение жесткости гофрированной стенки к цилиндрической жесткости плоской стенки одинаковой толщины.

Критическое касательное напряжение общей потери устойчивости гофрированных стенок с круглыми отверстиями определяется по формуле (15), при этом коэффициенты условий работы вводятся в числитель:

- в стенках с отверстиях диаметром $d_h \leq 0,25 h_w$;
- в стенках с отверстиях диаметром $0,25 h_w \leq d_h \leq 0,5 h_w$.

Местная устойчивость гофрированных стенок балок симметричного сечения требует расчета при локальном напряжении, $\sigma_{loc} \neq 0$, и определяется по формуле (18):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c, \quad (18)$$

где σ_{loc} и $\tau_{xy,max}$ определяют по требованию пункта 7.15 [23 с.31];

$\tau_{p,cr}$ – определяемые по формуле (12);

$\sigma_{loc,cr}$ – нормальные критические напряжения гофрированной стенки, при действии сосредоточенной нагрузки, определяемые по формуле (19):

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{0,8C_1R_y}{\bar{\lambda}_c^2}, \quad (19)$$

где $\bar{\lambda}_c^2$ определяется по формуле (13).

C_1 – отношение высоты стенки и ширины панели гофра, коэффициент принимается по таблице 3.2 в зависимости от отношения b_w/h_w и значения δ , определяемого по формуле (20):

$$\delta = 0,8 \frac{b_f}{h_w} \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3, \quad (20)$$

где b_w и h_w – ширина и толщина сжатого пояса балки.

Общая устойчивость гофрированных стенок балок симметричного сечения требует расчета при локальном напряжении, $\sigma_{loc} \neq 0$, и определяется по формуле (21):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{y,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{o,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c, \quad (21)$$

где σ_{loc} и $\tau_{xy,max}$ определяют по требованию пункта 7.15 [126];

$\tau_{o,cr}$ – критическое касательное напряжение общей потери устойчивости гофрированной стенки, определяемое по формуле (15);

$\sigma_{y,cr}$ – нормальные критические напряжения потери устойчивости гофрированной стенки, рассчитанной на продольный изгиб из плоскости, как стойки нагруженной сосредоточенной силой F , определяемые по формуле (22):

$$\sigma_{y,cr} = \varphi R_y \leq \sigma_{loc,cr}, \quad (22)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый [126 с.114] для условной стойки, которая центрально сжата, гибкость определяют по формуле (23):

$$\lambda = 2,5h_w/f, \quad (23)$$

Проверяя устойчивость гофрированной стенки по формулам (18) и (21) требуется соблюдение условий:

1) отношение действующих локальных напряжений (σ_{loc}) к критическим напряжениям местной потери устойчивости гофра ($\sigma_{loc,cr}$) не должно превышать величины, определяемой по формуле (24):

$$\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}} \leq 0,75\gamma_c, \quad (24)$$

где γ_c – коэффициент условия работы;

2) размер эксцентриситета, с которым передается сосредоточенная нагрузка приложенной нагрузки, относительно продольной оси балки не должна превышать $0,25f$.

2.3.1.2 Расчет на прочность элементов двутаврового сечения с поперечно–гофрированной стенкой

Прочность двутавровой балки с поперечно–гофрированной стенкой, при центральном растяжении или сжатии силой N рассчитывают по формуле (25):

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c, \quad (25)$$

где A_n – площадь нетто поясов двутавровой поперечно–гофрированной балки (суммарная);

R_y – расчетное сопротивление стали на растяжение, изгиб по пределу текучести и сжатие;

γ_c – принимаемый по таблице 6 [126 с.9] коэффициент условия работы.

Прочность двутавровой поперечно–гофрированной балки во включении стенки в работу на изгиб, проверяется по формуле (26):

$$\begin{aligned} \frac{M}{W_r} &\leq R_y \gamma_c, \\ \frac{Q}{0,9A_w} &\leq R_s \gamma_c, \end{aligned} \quad (26)$$

где M – максимальный изгибающий момент в расчетном сечении;

Q – максимальная поперечная сила в расчетном сечении балки с поперечно–гофрированной стенкой;

A_w – площадь сечения стенки балки с поперечно–гофрированной стенкой;

R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу.

Момент сопротивления поперечно–гофрированной балки определяется по формуле (27):

$$W_r = A_f h_1 + \beta t_w h_w^2 / 6, \quad (27)$$

где A_f – площадь сечения пояса балки;

h_1 – расстояние между осями поясов поперечно–гофрированной балки;

$\beta < 1$ – коэффициент уменьшающий момент сопротивления стенки из–за гофрирования [128], определяемый в зависимости от параметров гофр, по нижеуказанным формулам (28–30):

$$\beta = \xi + 2 C (1 - \xi)(1 - C + 0,4C^2), \quad (28)$$

$$C = a/h_w \sqrt{f}, \quad (29)$$

$$\xi = \frac{1/\sqrt{1+(\frac{f}{a})^2}}{1+(\frac{f}{a})^2+(1-\nu^2)(\frac{f}{t_w})^2}, \quad (30)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

По данным нормативных документов [129, 130], восприятие изгибающего момента поперечно–гофрированной стенкой равняется не больше 3%, поэтому в расчете подбирается методика, где поясные листы балки воспринимают усилия от изгибающих моментов, при этом гофрированная стенка воспринимает поперечную нагрузку.

На основании вышеизложенного прочность поясов балки с поперечно–гофрированной стенкой двутаврового сечения с изгибом в одной плоскости определяется по нижеуказанной формуле (31):

$$\sigma_f = \frac{M}{A_{fn}h_1} \leq R_y\gamma_c, \quad (31)$$

где $h_1 = h_w + t_f$ – это расстояние между центрами тяжести поясов балки;
 A_{fn} – меньшая площадь нетто из двух поясов двутавра.

Необходимо удовлетворение условий в изгибаемых элементах двутаврового сечения балки с поперечно–гофрированной стенкой значений касательного напряжения τ (32):

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{h_w t_w} \leq R_s \gamma_c \gamma_{wc}, \quad (32)$$

где γ_{wc} – в балке с поперечно–гофрированной стенкой коэффициент на срез, принимаемый 0,9.

В случае приложения нагрузки к верхнему поясу в балках с поперечно–гофрированной стенкой выполняют расчет на прочность [131, 132], определяя местное напряжение σ_{loc} по формуле (33):

$$\sigma_{loc} = \frac{F}{t \cdot l_{ef}}, \quad (33)$$

где F – расчетная нагрузка (сила).

l_{ef} – это условная длина распределения нагрузки, зависящая от условий опирания, определяемая по формуле (34):

$$l_{ef} = b + 2t_f, \quad (34)$$

t_f – толщина верхнего пояса балки.

Для балок с поперечно–гофрированной стенкой, которые рассчитывают по формуле (31), также необходимо выполнение условий формулы (35):

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} &\leq 1,15R_y\gamma_c, \\ \tau_{xy} &\leq R_s\gamma_c, \end{aligned} \quad (35)$$

где σ_y – нормальное напряжение в срединной плоскости стенки, перпендикулярное оси балки, то же для σ_{loc} определяемого по формуле (33);

τ_{xy} – определяемое по формуле (32) касательное напряжение.

2.3.1.3 Предложения по выбору отверстий в балке с поперечно–гофрированной стенкой

В соответствии с [126 с.78] в двутавровых балках с гофрированной стенкой при наличии соответствующего расчета, возможно устройство круглых отверстий, имеющих диаметр d_h , не больше, чем половина высоты стенки h_w с обязательной установкой листовой или угловой стали для их окаймления, а также усиление при помощи вертикальных ребер жесткости (рисунок 14).

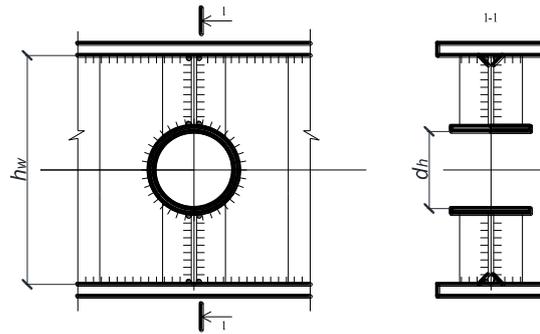
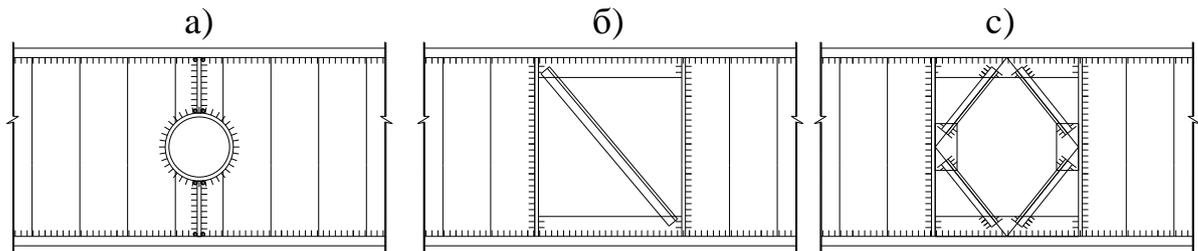


Рисунок 14 – Двутавровая балка с гофрированной стенкой с круглым отверстием, окаймленным листовой сталью

Устройство отверстий в разрезных гофрированных балках допустимо. Круглое отверстие возможно при $\tau \leq 0,5R_s$, но диаметром не более половины высоты стенки, при этом отверстие должно быть расположено в центре относительно высоты стенки, которые окаймляются угловой или листовой сталью, подкрепленные парными вертикальными ребрами жесткости. В случае больших поперечных нагрузок возможно применение нижеприведенных конструктивных схем (рисунок 15).



- а) отверстие, усиленное окаймлением и ребрами жесткости;
- б) отверстие, усиленное листами и одним раскосом из уголка;
- в) отверстие, усиленное ромбической решеткой из парных уголков

Рисунок 15 – Конструктивные решения отверстий в гофрированных стенках:

2.3.2 Проектирование гофрированных конструкций с учетом требований СН РК EN 1993-1-5:2006/2011

Общие положения

Еврокод [133] – это документ, соответствующий техническим требованиям на строительные изделия и технические правила на производство строительных работ, имеющий установленные национальные параметры, которые предназначены для проектирования металлических зданий и сооружений на территории нашей республики, предъявляет свои требования к балкам с поперечно-гофрированными стенками.

Общие положения данного документа действуют на балки двутавровые балки синусоидального и трапециевидного профиля.

2.3.2.1 Определение несущей способности по минимальному изгибу

Несущую способность по изгибающему моменту принимают минимальной из полученных значений из нижеприведенных формул (36–38):

$$M_{y,Rd} = \frac{b_2 t_2 f_{yf,r}}{\gamma_{MO}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) - \text{растянутый пояс}; \quad (36)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{b_1 t_1 f_{yf,r}}{\gamma_{MO}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) - \text{сжатый пояс}; \quad (37)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{b_1 t_1 \chi f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) - \text{сжатый пояс}, \quad (38)$$

где $f_{yf,r}$ – это предел текучести, уменьшаемый за счет действия моментов поперечного изгиба в поясах, определяемый по формулам (39 и 40):

$$f_{yf,r} = f_{yf} f_T, \quad (39)$$

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{MO}}}}, \quad (40)$$

здесь $\sigma_x(M_z)$ – вызываемое моментом поперечного изгиба напряжение в поясе, определяемый из передачи усилий сдвига от стенки в пояс;

χ – понижающий коэффициент, вводимый при потере устойчивости пластины, который определяется по пункту 6.3 [134].

f_T – принимается равным 1 в балках с поперечно-гофрированной стенкой синусоидального профиля.

2.3.2.2 Определение несущей способности при сдвиге

Несущая способность при сдвиге определяется по формуле (41):

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} h_w t_w, \quad (41)$$

где χ_c – наименьший понижающий коэффициент при местной потере устойчивости $\chi_{c,l}$ при общей потере устойчивости $\chi_{c,g}$.

Наименьший понижающий коэффициент при местной потере устойчивости пластины определяется по нижеуказанной формуле (42):

$$\chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0, \quad (42)$$

где,

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} \sqrt{3}}};$$

$$\tau_{cr,l} = 4,83E \cdot \left[\frac{t_w}{a_{max}} \right]^2,$$

a_{max} – следует принимать наибольшим из значений a_1 и a_2 .

В соответствии с Еврокодом [133] для балок с гофрированной стенкой национальными приложениями даются указания по определению $\chi_{c,l}$ и $\tau_{cr,l}$, при этом рекомендуемой формулой для их определения является (43):

$$\tau_{cr,l} = \left(5,34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \cdot \frac{\pi^2 E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{s} \right)^2, \quad (43)$$

где w – длина проекции полуволны (рисунок мм);

s – длина полуволны в развернутом виде (рисунок мм).

2.3.3 Требования к проектированию и расчету в зарубежных нормативных документах

При тщательном анализе европейских и российских норм по проектированию и расчету БГС можно найти схожести и различия в обозначениях и самих значениях коэффициентов и других величин (таблица 1).

Таблица 1 – Сопоставление обозначений расчетных величин

Расчетная величина и ее обозначение по европейским нормам [135, 136]	Расчетная величина и ее обозначение по российским нормам [137, 138]
Частный коэффициент безопасности γ_{Mi} , – $\gamma_{M0} = 1,00$ – при расчете на прочность; – $\gamma_{M1} = 1,10$ – при расчете на устойчивость; – $\gamma_{M3} = 1,25$ – при расчете с использованием временного сопротивления;	Статические коэффициенты: – условий работы элемента, для сплошных балок $\gamma_c = 0,9$; – по назначению $\gamma_n = 0,9 \dots 1,0$ в зависимости от назначения здания; – надежности при расчете элементов с использованием временного сопротивления $\gamma_M = 1,3$.
Расчетное сопротивление стали: – f_y – по пределу текучести; – f_u – по временному сопротивлению.	Расчетное сопротивление стали при растяжении, сжатии, изгибе. – R_y – по пределу текучести; – R_u – по временному сопротивлению. Расчетное сопротивление при сдвиге: R_s
Значение силового фактора в сечении: – M_{Ed} – расчетное значение изгибающего момента; – V_{Ed} – расчетное значение поперечной силы.	Значение силового фактора в сечении: – M – расчетное значение изгибающего момента; – Q – расчетное значение поперечной силы
Предельная несущая способность элемента: – $M_{c,Rd}$ – расчетное значение предельного изгибающего момента; – $V_{d,Rd}$ – расчетное значение предельной поперечной силы.	Предельная несущая способность элемента: – M_u – расчетное значение предельного изгибающего момента; – Q_u – расчетное значение предельной поперечной силы.

Выводы по 2 разделу

1. Работу балки с поперечно-гофрированной стенкой можно разделить на четыре стадии:

– *Стадия 1.* Докритическая работа: упругая работы стенки и пояса. При большой гибкости $200 \leq \gamma_w = \frac{h_w}{t_w} \leq 800$, конструкция способно потерять устойчивость, после нагружения;

– *Стадия 2.* Закритическая работа, вторая стадия устойчивой формы работы конструкции, когда в местах сдвига появляются складки (диагональные), а в середине балки поверхность стенки деформируется, и образуются выпуклости сжатого пояса;

– *Стадия 3.* Упругопластическая работа отсека. Напряжения перераспределяются и скапливаются в углах отсека. Пластические деформации появляются в поясах и стенках балки;

– *Стадия 4.* Потеря несущей способности. Увеличиваются зоны пластической работы и появляются пластические шарниры. Увеличиваются деформации.

2. Основными факторами, влияющими на несущую способность балки с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями, являются: отверстия в балке, шаг отверстий в стенке балки, очертание отверстия, гибкость стенки, а также центр отверстия относительно высоты стенки.

3. Исследование по влиянию отверстий на напряженно-деформированное состояние конструкции играет большую роль как с теоретической, так и с практической точки зрения. Концентрация напряжений, характеризующаяся коэффициентом концентрации, это одна из главных проблем по минимизации местных напряжений, которую постоянно пытаются решить проектировщики гофрированных конструкций, ослабленных отверстиями.

4. При выполнении отверстий в стенке балки происходит ослабление ее несущей способности, причем в случае действия помимо изгибающего момента еще и поперечной силы, снижает ее еще больше.

5. Расчет гофрированных балок с синусоидальным очертанием профиля, предлагаемый в европейских нормах, применим, например, для гофрированных балок выпускаемых фирмой «Zeman», при параметрах гофров $\frac{f}{a} \geq 0,5$;

6. Вероятность потери устойчивости стенки в соответствии с европейской методикой расчета на сдвиг уменьшена, критическое напряжение равняется от 60 до 85% расчетного сопротивления, а в российской методике расчета 30–60%, с учетом одинаковых параметров гофров $\frac{f}{a}$.

7. Методики расчета гофрированных конструкций, которые предлагают и используют европейские ученые увеличивают несущую способность на сдвиг до 20–30% в сравнении с расчетами по нормам, принятым на территории нашей республики.

8. Выполнение отверстий большого диаметра требуют более тщательного подхода к их выполнению, потому что они ослабляют общую несущую способность гофрированной стенки балки на срез, за счет уменьшения поперечного сечения стенки, но при этом при чистом изгибе несущая способность стенки

менее подвержена ослаблению. Поэтому расположение отверстий необходимо выбирать в тех местах стенки, где наименьшая концентрация напряжений от поперечных сил, т.е. ближе к середине пролета балки. Однако данные гипотезы также требуют более тщательного исследования.

9. В научных трудах, доступных в печати, отсутствуют требования теоретических и экспериментальных исследований о влиянии усиленных отверстий на несущую способность балки с поперечно-гофрированной стенкой. Поэтому вопрос об усилении отверстий требует отдельного внимания и дальнейших исследований.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ СТЕНОК С РАЗЛИЧНЫМ ОЧЕРТАНИЕМ ГОФРОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ

Основными критерием оптимальности выбора вида очертания гофра, принимаемого для дальнейшего исследования, будут параметры, по которым будет проведен сравнительный анализ.

Наиболее точным будет считаться анализ, учитывающий наибольшее количество параметров. Такими показателями могут быть предельная ширина панели гофра, толщина стенки гофра, гибкость панели стенки, предельная высота панели гофра, предельная длина балки, момент инерции, приведенный момент инерции, минимальный момент сопротивления, приведенный минимальный момент сопротивления, радиус инерции, расход стали на 1 п.м. и т.д.

Сравнительный анализ выполнялся для гофров волнообразного (Sin балка, Австрия), трапециевидного (Швеция) и треугольного (Казахстан) очертания и различной толщины металла гофрированной стенки, начиная от 2 мм до 10 мм, а также плоской стенки аналогичных толщин.

Для более удобного чтения результатов сравнительного анализа полученные данные были сведены в таблицы, а также визуально отображены на графиках.

Методика определения требуемых параметров для выбора наиболее оптимального вида гофра была принята компьютерная, использовался программный комплекс Тонус на базе вычислительного комплекса Scad [139].

3.1 Оценка геометрических параметров гофров с плоской, волнообразной, трапециевидной и треугольной формой стенки

Вначале была дана оценка геометрическим параметрам заявленных гофров с различными формами стенки. Полученные данные, в зависимости от толщины стенки гофра, сводились в разные таблицы, приведенные в Приложении Е.

Для подробного описания характеристик гофров, был принят следующий вариант обозначения основных данных для сравнения (рисунок 16):



Рисунок 16 – Образец обозначения основных геометрических характеристик сечения

3.2 Оценка влияния параметров гофров на их устойчивость стенки

Влияние параметров гофров на их устойчивость представлено в виде найденного фактического момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки и эквивалентной толщины плоской стенки. На рисунках 17–23 графически представлено значение приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки различной толщины и эквивалентной толщины плоской стенки.

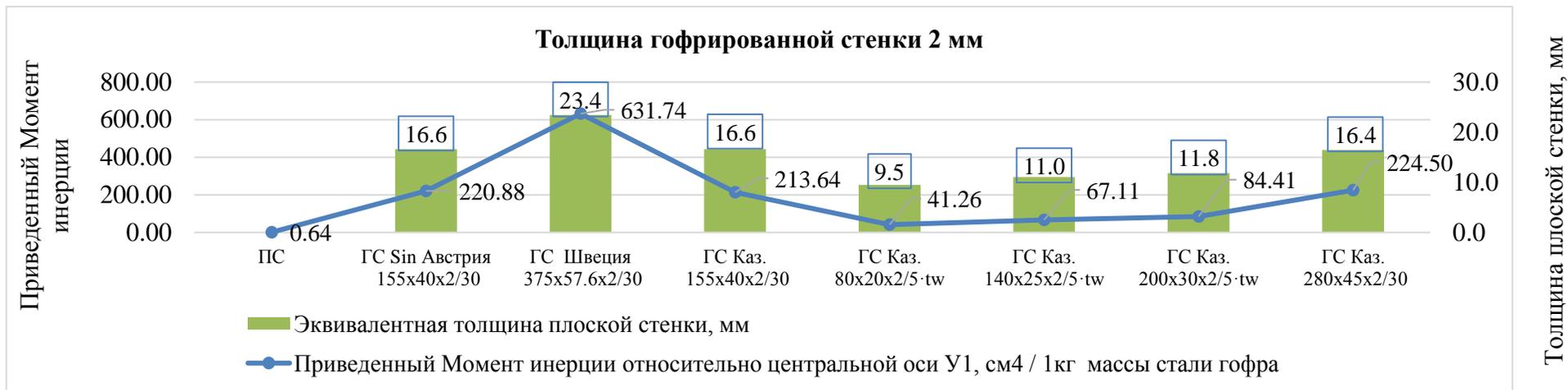


Рисунок 17 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 2мм и эквивалентной толщины плоской стенки

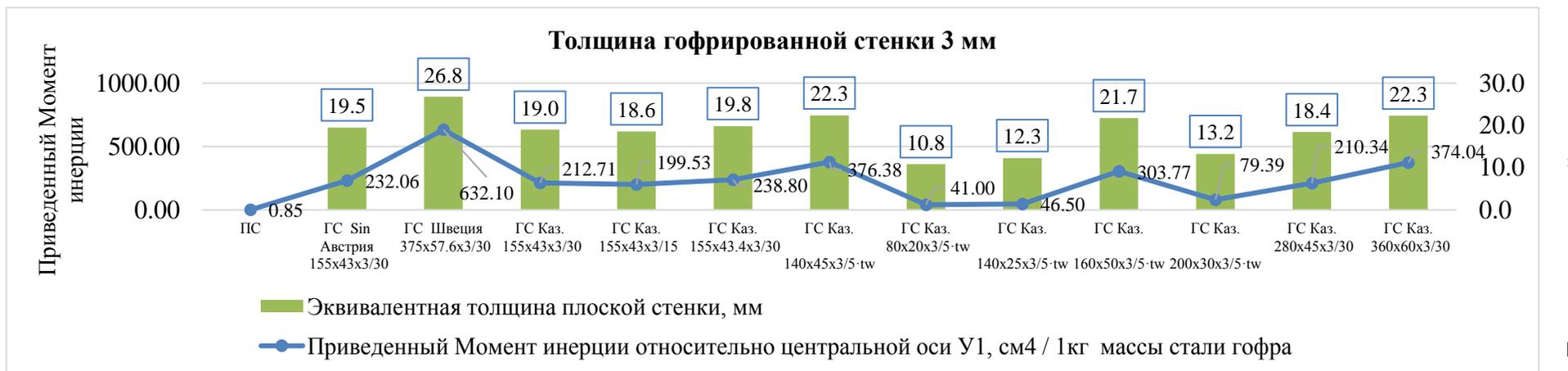


Рисунок 18 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 3мм и эквивалентной толщины плоской стенки

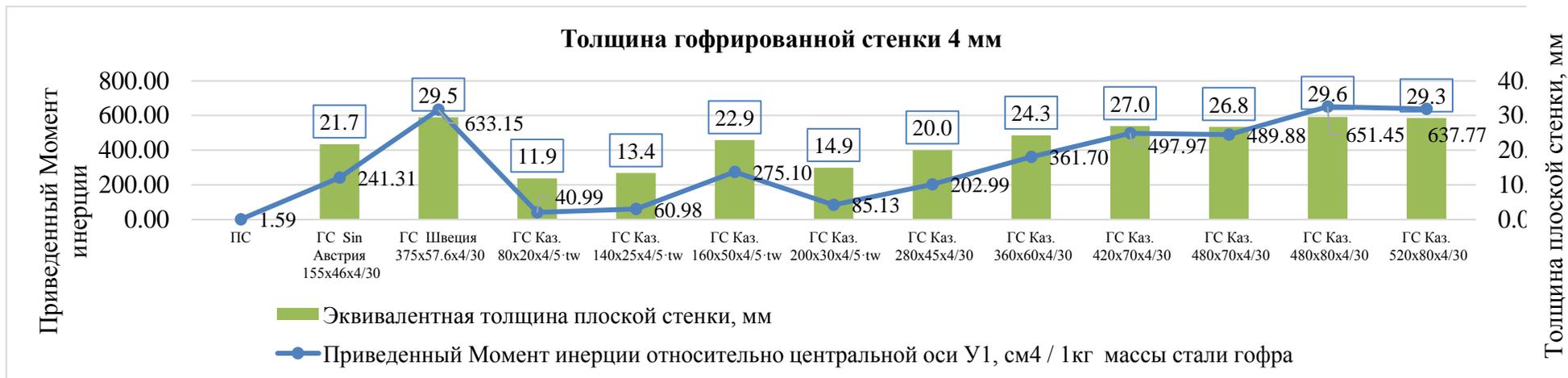


Рисунок 19 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 4мм и эквивалентной толщины плоской стенки

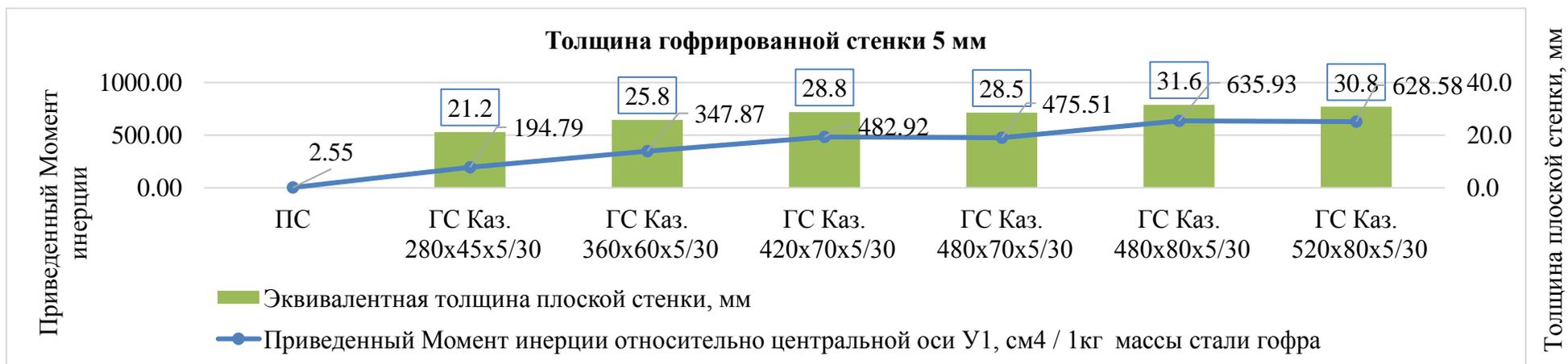


Рисунок 20 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 5мм и эквивалентной толщины плоской стенки

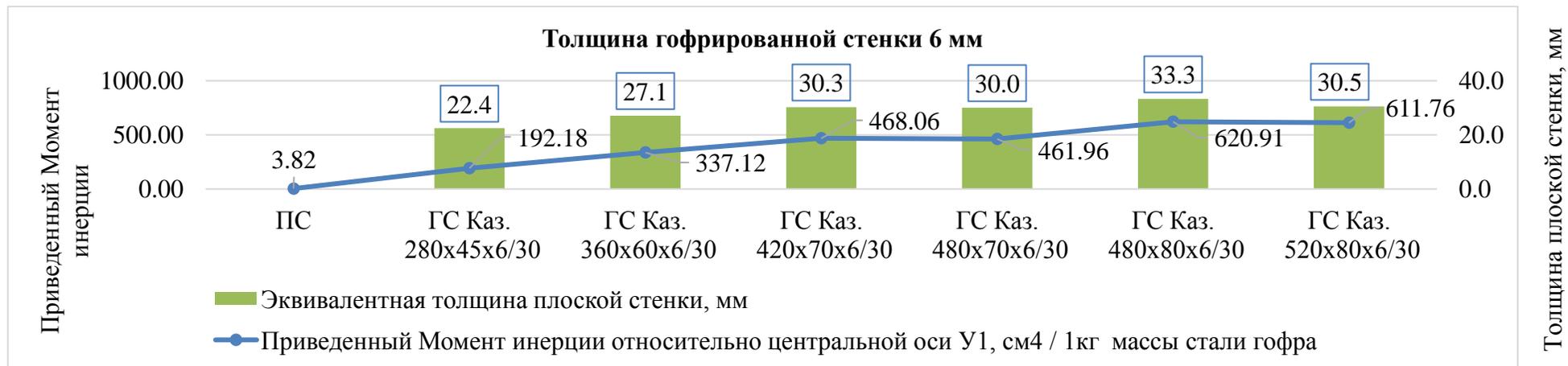


Рисунок 21 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 6мм и эквивалентной толщины плоской стенки

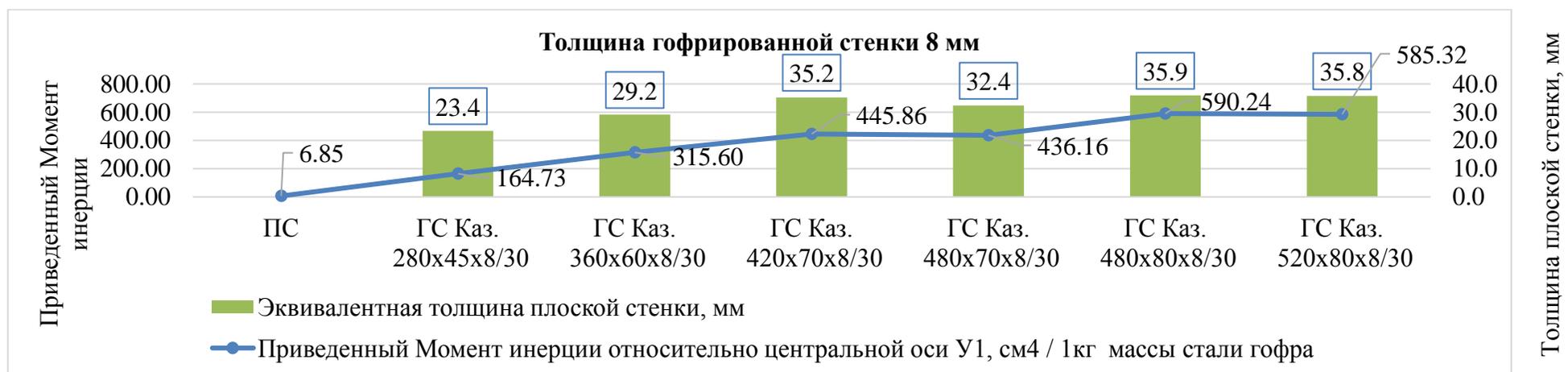


Рисунок 22 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 8 мм и эквивалентной толщины плоской стенки

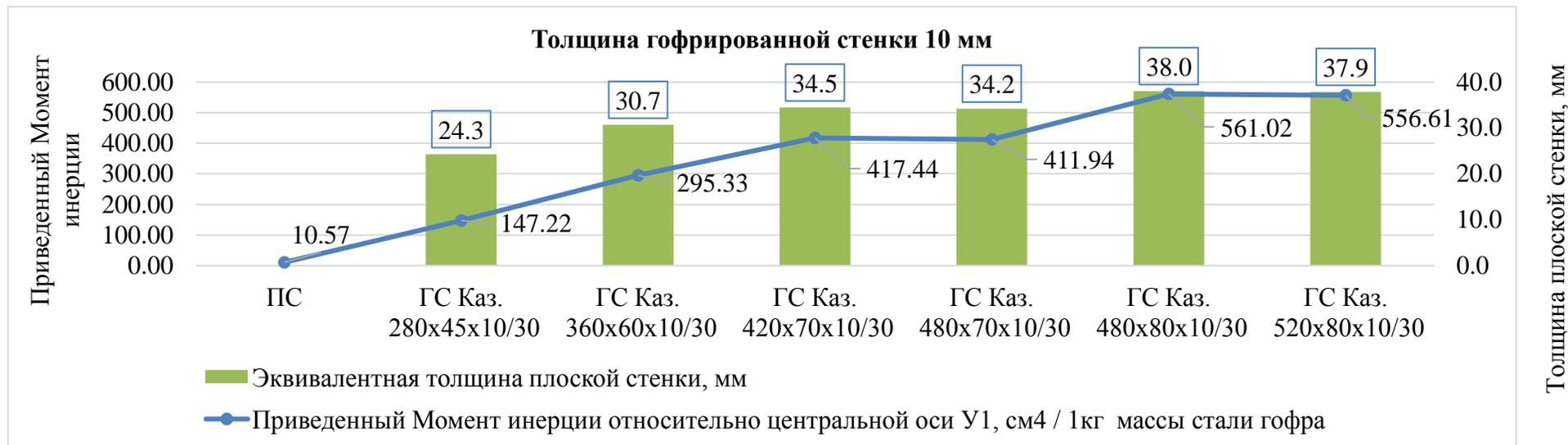


Рисунок 23 – График приведенного момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки толщиной 10 мм и эквивалентной толщины плоской стенки

3.3 Оценка влияния параметров гофров на их прочность стенки

Влияние параметров гофров на их прочность представлено в виде найденного фактического момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и фактического расхода стали на 1 погонный метр гофрированной стенки различного очертания гофров. Сравнительный анализ выполнен по данным полученным в Приложении Е.

На рисунках 24–30 графически представлено значение приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки различной толщины и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки.

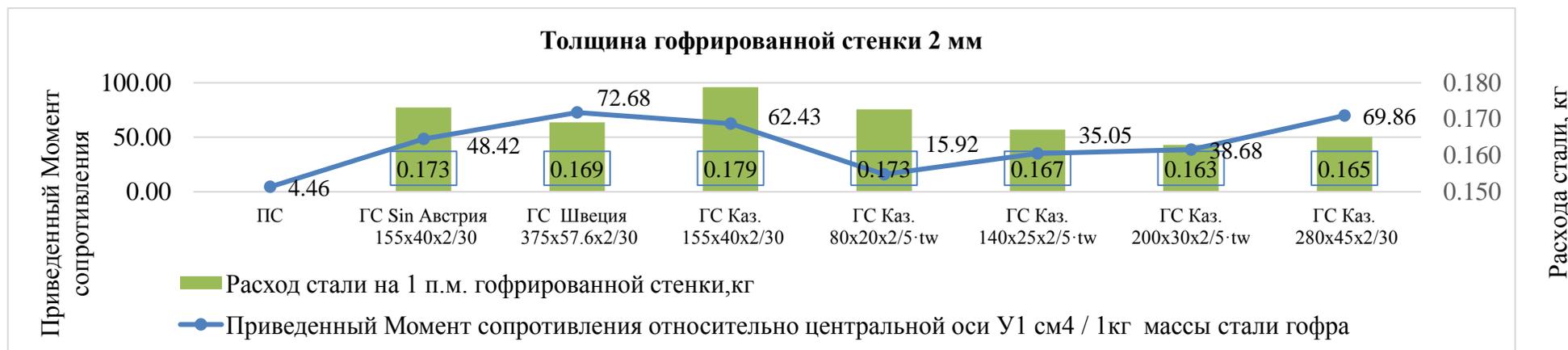


Рисунок 24 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 2 мм

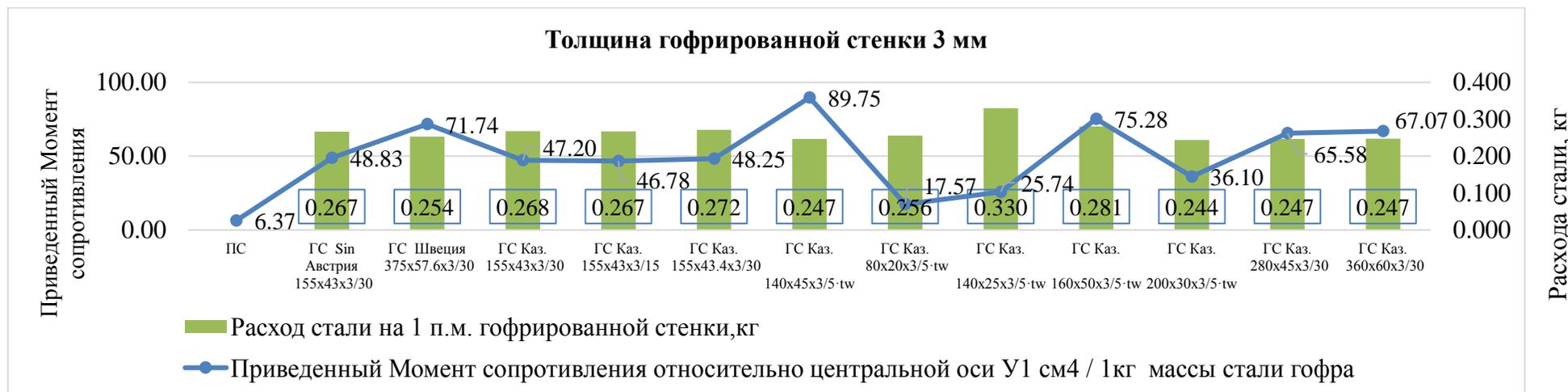


Рисунок 25 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 3 мм

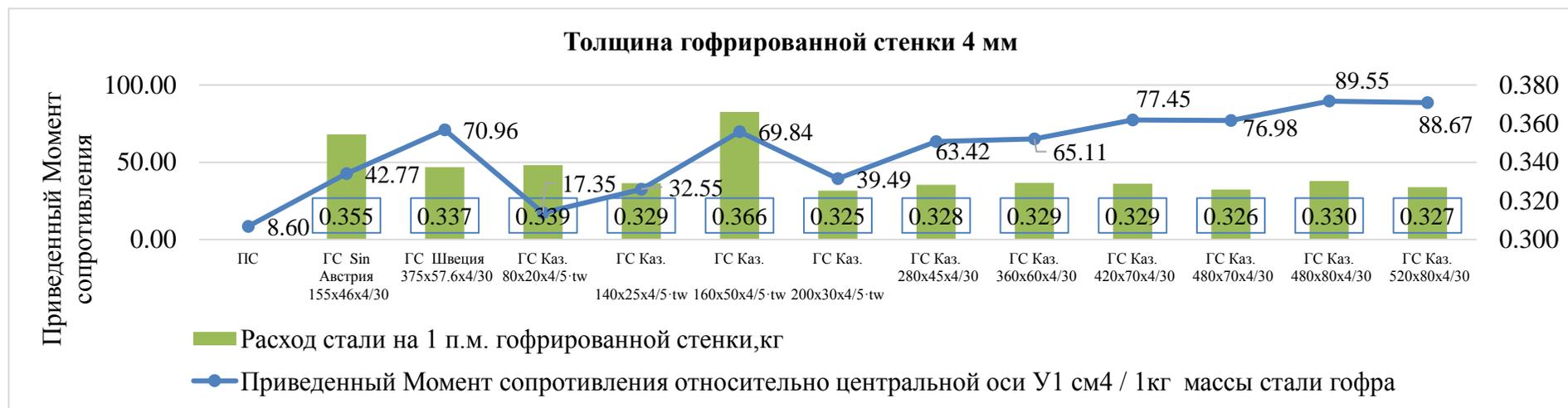


Рисунок 26 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 4 мм

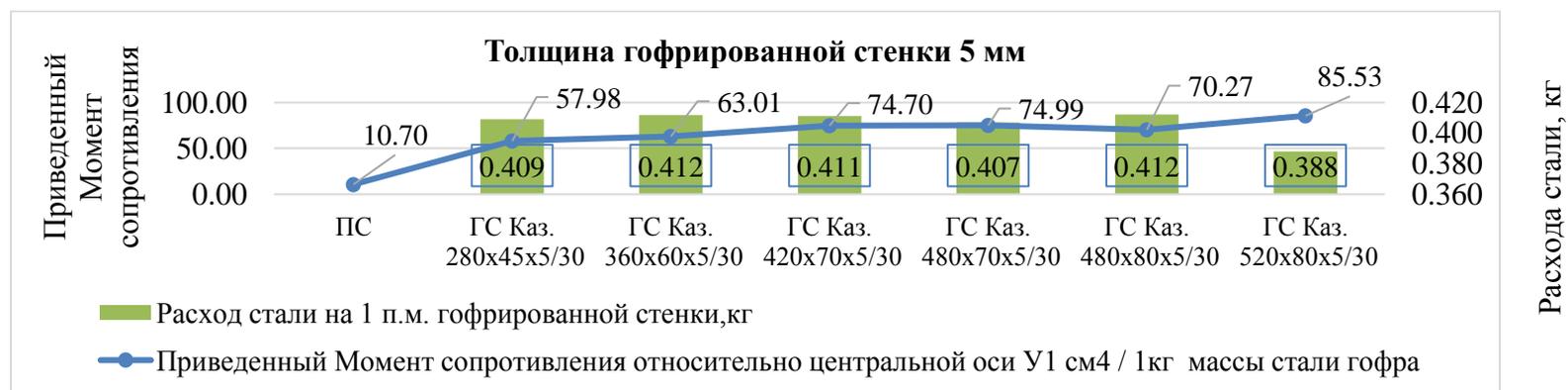


Рисунок 27 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 5 мм

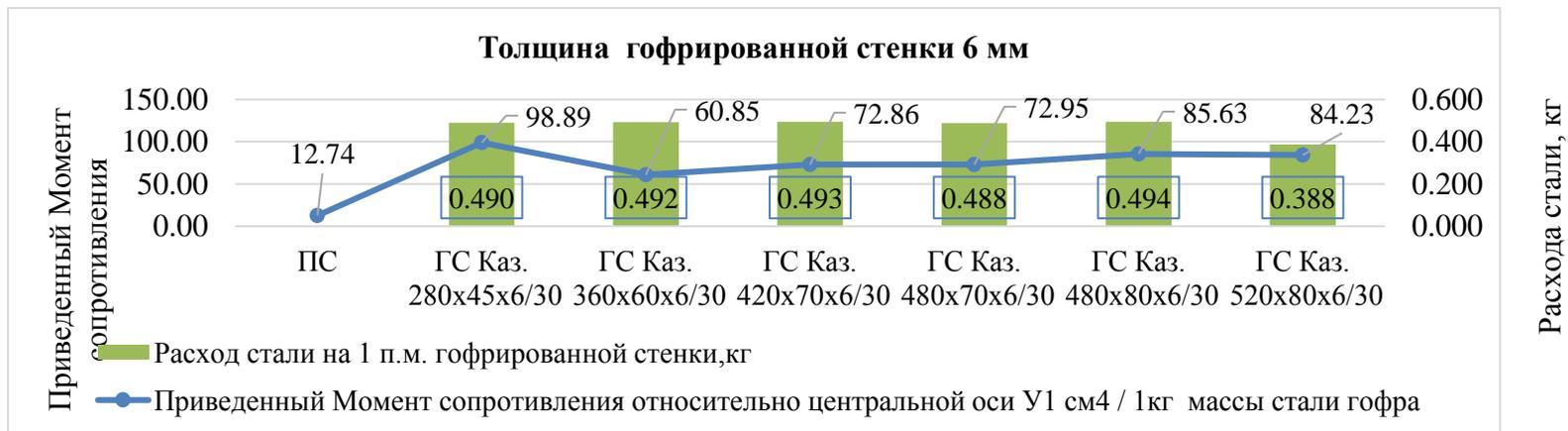


Рисунок 28 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 6 мм

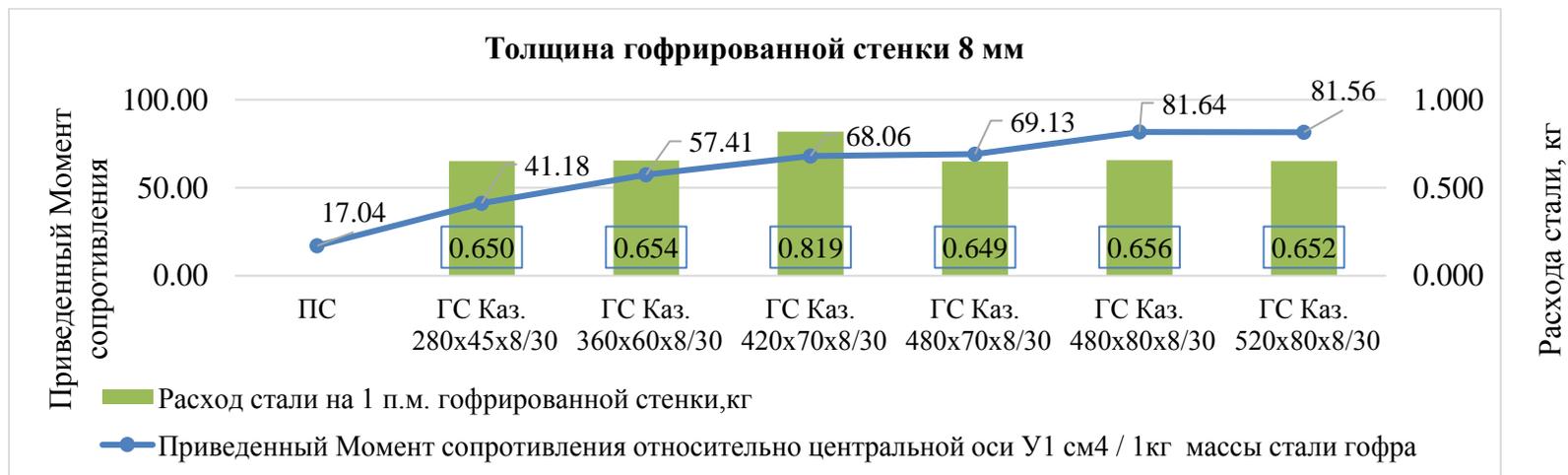


Рисунок 29 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 8 мм

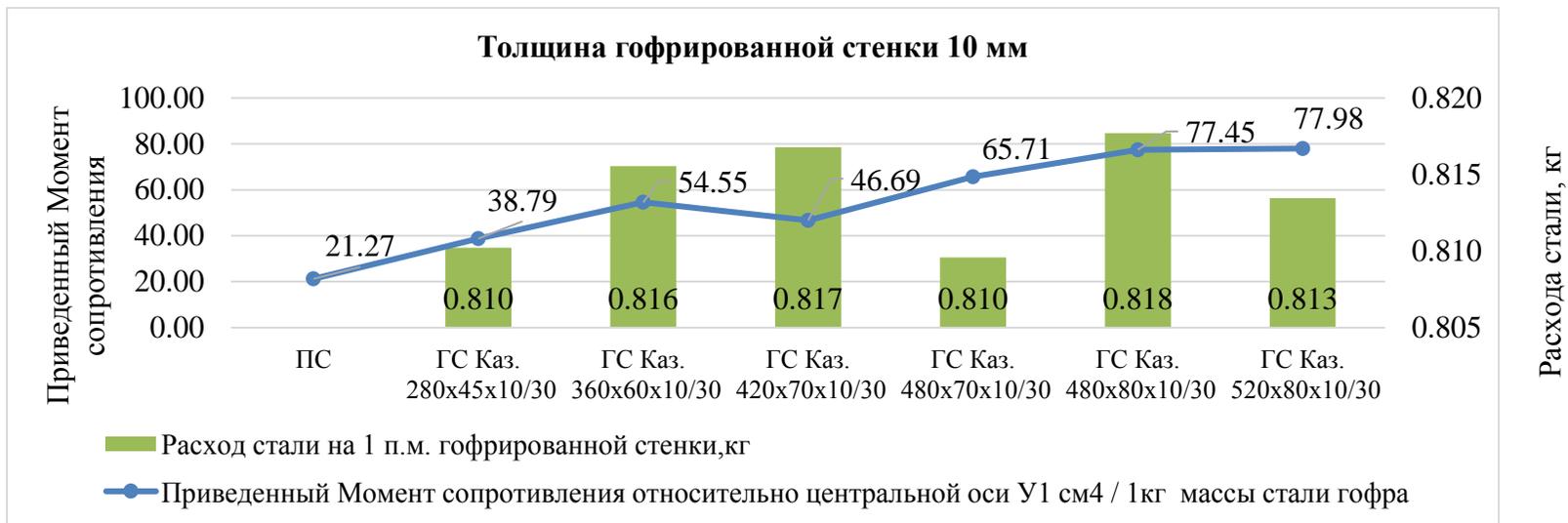


Рисунок 30 – График приведенного момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки и расхода стали на 1 п.м. гофрированной стенки толщиной 10 мм

3.4 Сравнительный анализ по расходу стали в гофрированных стенках

Одним из главных показателей экономической эффективности балок с гофрированными стенками является расход стали. Наиболее эффективными в соответствии с данными [140] по виду гофров являются трапециевидные гофры. Однако отсутствует информация о трапециевидных гофрах толщиной более 4 мм, а близким по форме, принципу работы и изготовлению для балок с треугольным очертанием гофр казахстанского изготовления являются балки с синусоидальным видом гофра. Именно по этим причинам сравнительный анализ будет выполнен между двумя типами гофров. Сравнительный анализ выполнен по данным, которые приведены в Приложении Е.

На рисунках 31–37 графически представлено процентное соотношение по расходу стали всех рассмотренных гофрированных стенок с треугольным очертания гофров к Sin балке и балке ГС Каз 280×45.

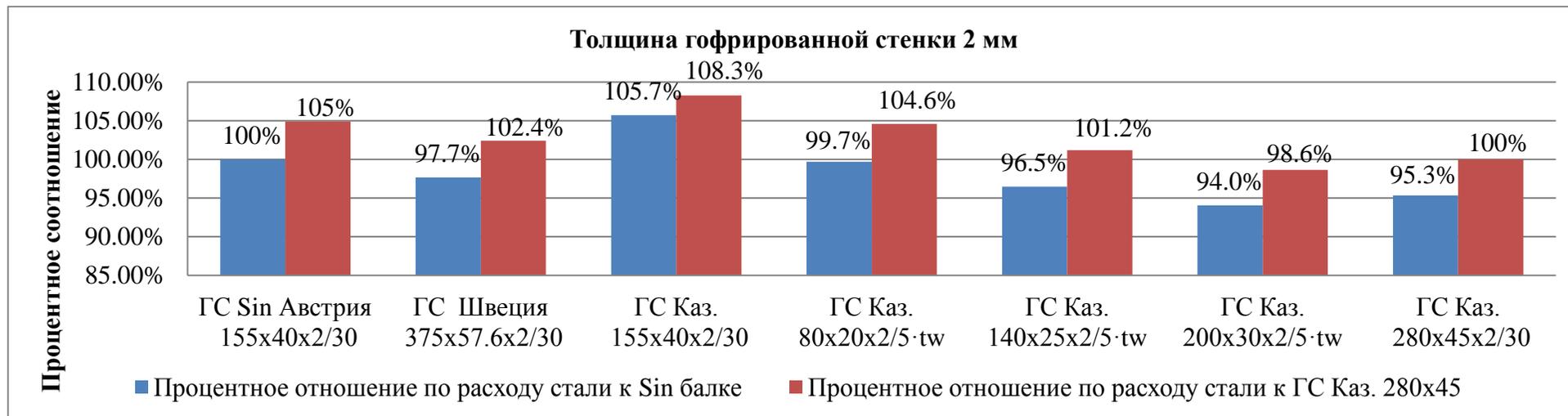


Рисунок 31 – График процентного соотношения по расходу стали к Sin балке и балке ГС Каз 280×45×2

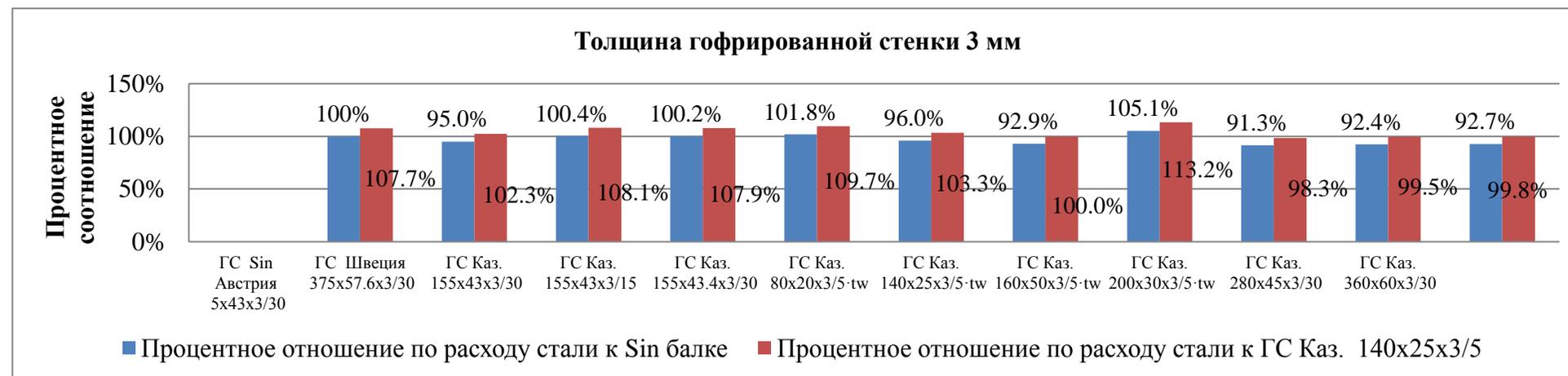


Рисунок 32 – График процентного соотношения по расходу стали к Sin балке и балке ГС Каз 140×25×3

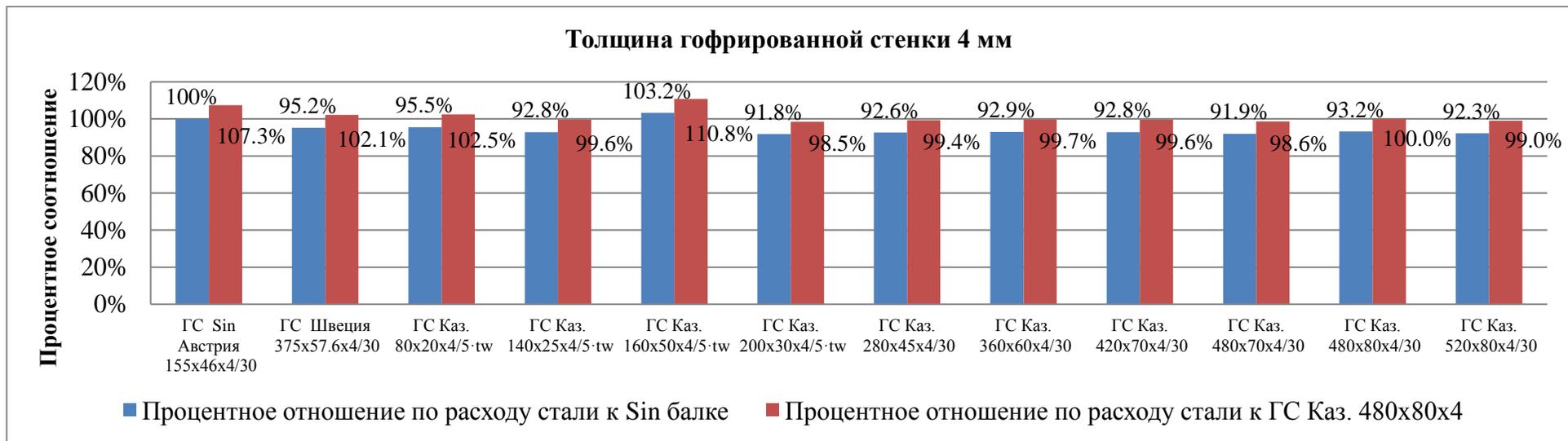


Рисунок 33 – График процентного соотношения по расходу стали к Sin балке и балке ГС Каз 480×80×4

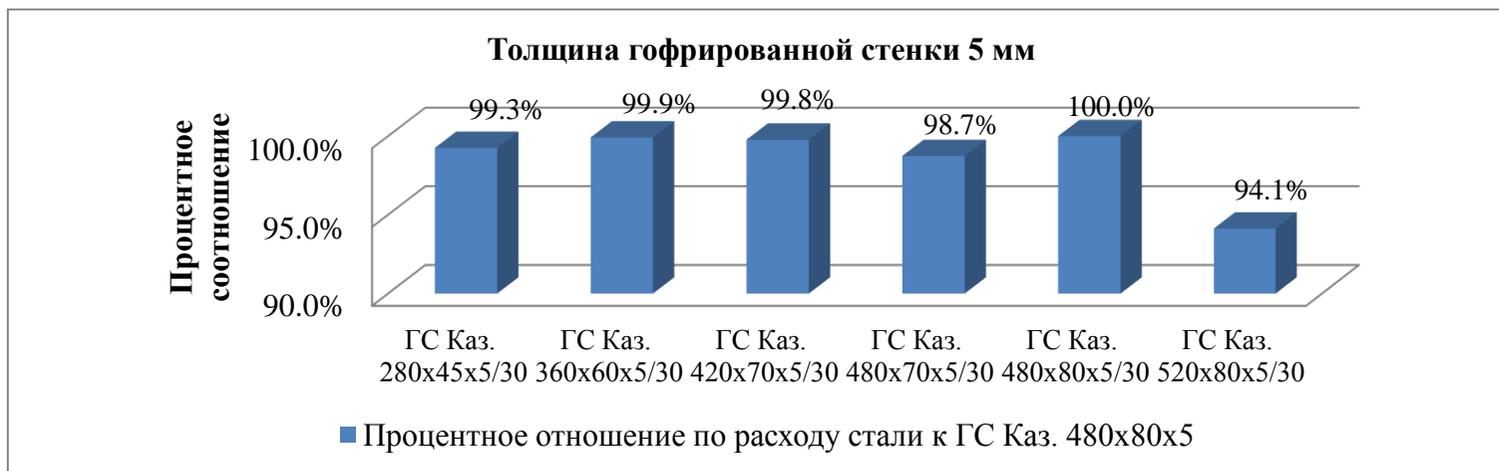


Рисунок 34 – График процентного соотношения по расходу стали к балке ГС Каз 480×80×5

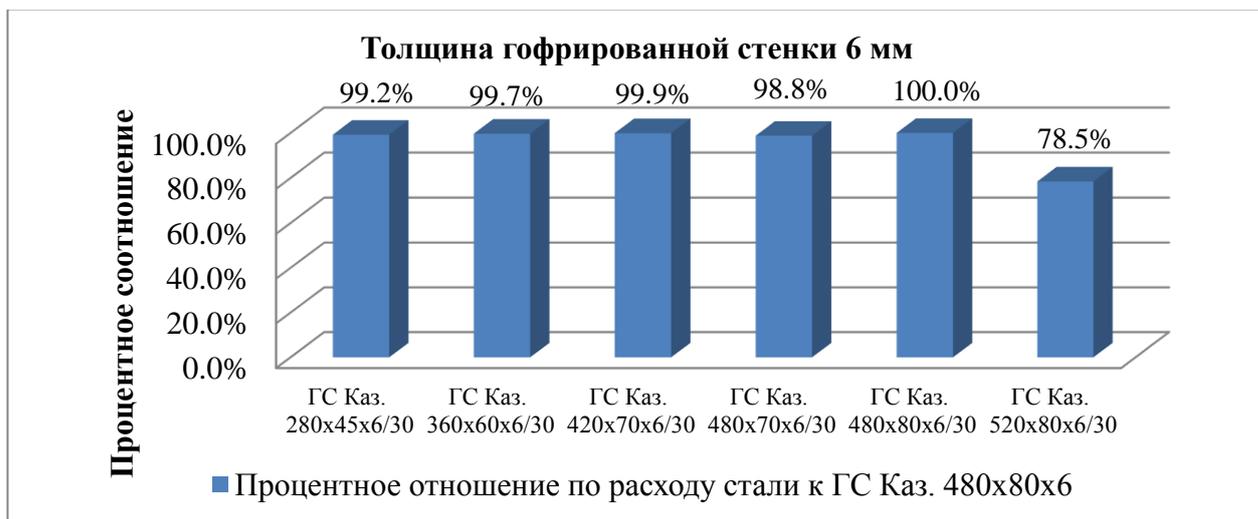


Рисунок 35 – График процентного соотношения по расходу стали к балке ГС Каз 480×80×6

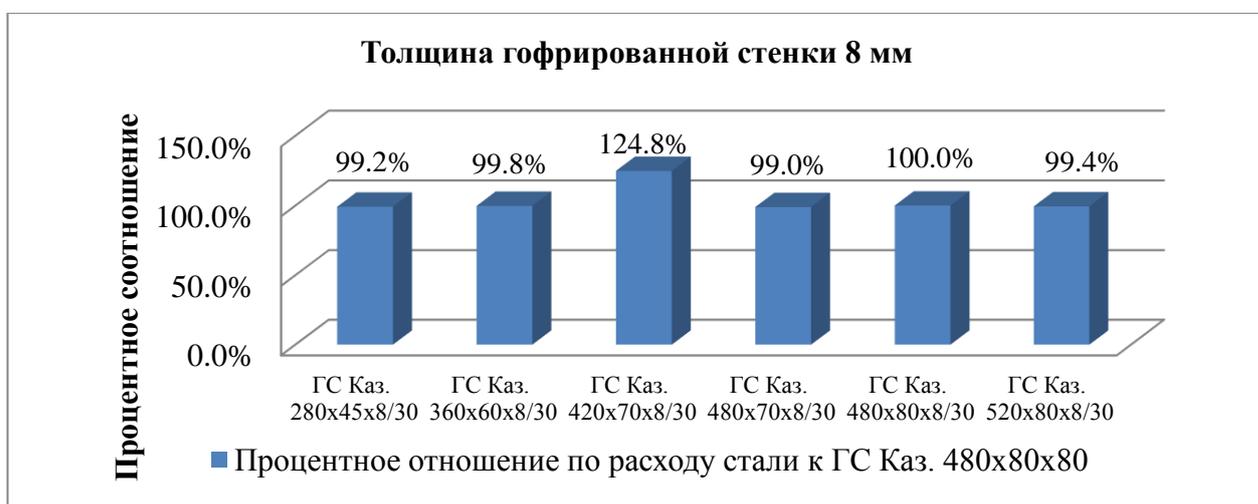


Рисунок 36 – График процентного соотношения по расходу стали к балке ГС Каз 480×80×8

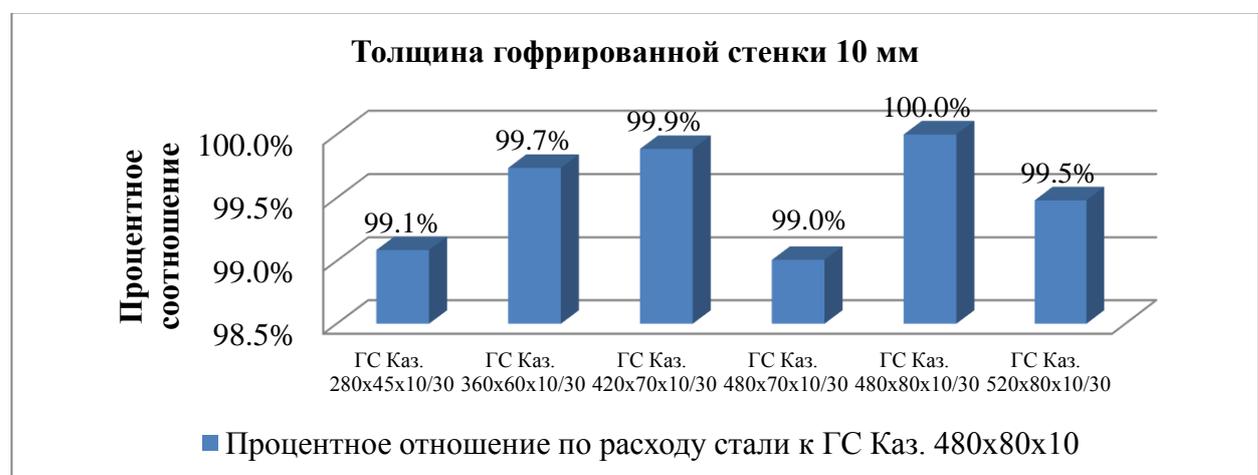


Рисунок 37 – График процентного соотношения по расходу стали к балке ГС Каз 480×80×10

3.5 Классификация поперечного сечения гофрированной балки

По данным [134], важной задачей является классификация поперечного сечения балки как с плоской стенкой, так и с гофрированной. При этом определяются границы, при достижении которых несущая способность поперечного сечения ограничивается потерей местной устойчивости.

Поперечные сечения разделяют на четыре класса (рисунок 38):

– к первому классу относят поперечные сечения, в которых для пластического расчета без уменьшения несущей способности может быть образован пластический шарнир с вращательной способностью;

– ко второму классу относят поперечные сечения с ограниченной вращательной способностью в ходе потери местной устойчивости, где могут начать развиваться пластические деформации;

– к третьему классу относят поперечные сечения, в которых потеря местной устойчивости препятствует развитию пластических деформаций, а также достигается предел текучести крайних сжатых волокон стальных элементов при упругом распределении напряжений;

– к четвертому классу относят поперечные сечения, при которых достигается предел текучести в одной или нескольких зонах поперечного сечения еще до потери местной устойчивости.

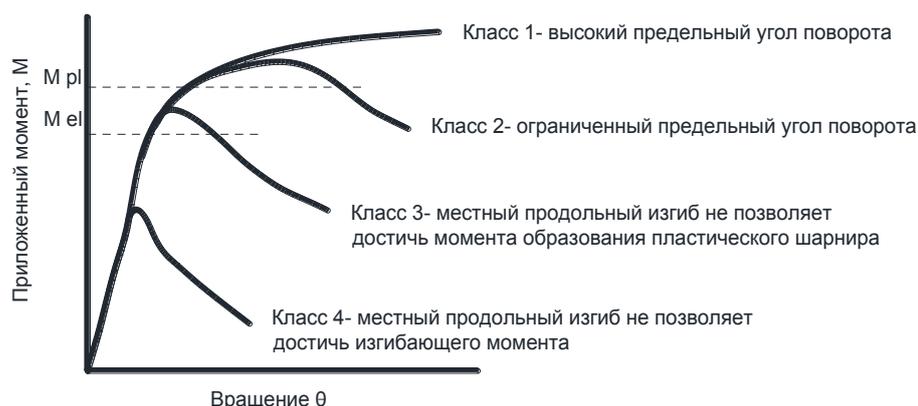


Рисунок 38 –Четыре класса поперечных сечений

В общем, по отношению ширины к толщине отдельных частей сечения, которые расположены в сжатой зоне, определяют класс поперечного сечения. При этом различные сжатые элементы сечения могут быть отнесены к различным классам. Отдельно выполняется классификация полок и стенок сечения. Классификация полного поперечного сечения выполняется по самому неблагоприятному классу его сжатых элементов.

Предельное отношение c/t для таких классов, как 1, 2 и 3 принимают по данным, если же элемент или часть сечения не соответствуют предельному отношению для сечения класса 3, то их относят к классу 4.

Если стенка классифицирована по классу 3, а полки имеют класс 1 или 2, то общее поперечное сечение может быть классифицировано как сечение класса 2 с эффективной полкой.

В случае, когда стенкой воспринимаются только поперечные силы, которые не повышают ее несущую способность по моменту и продольной силе, то поперечное сечение принимается как сечение класса 2, 3 или 4, которое зависит только от класса полки.

Таким образом, для определения класса поперечного сечения стенок балок, в том числе гофрированных необходимо соблюдение условий таблиц 2 и 3.

Таблица 2 – Максимальное отношение толщины стенки к ее высоте в сжатых внутренних участках сечения

Класс	Участок в условиях изгиба	Участок в условиях сжатия	Участок, подвергнутый изгибу и сжатию
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)			
1	$c/t \leq 72\varepsilon,$	$c/t \leq 33\varepsilon,$	При $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ При $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\varepsilon,$	$c/t \leq 38\varepsilon,$	При $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ При $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)			
3	$c/t \leq 124\varepsilon,$	$c/t \leq 42\varepsilon,$	При $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ При $\psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\varepsilon \cdot (1 - \psi) \sqrt{(-\psi)}$

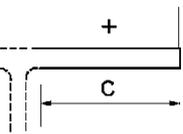
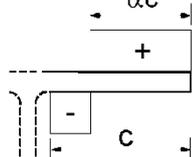
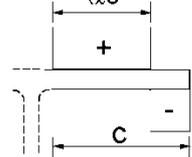
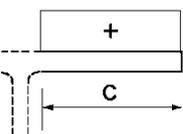
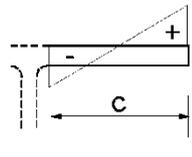
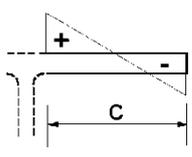
По данным таблицы 2: c – высота стенки балки, t – толщина стенки, ε – коэффициент, зависящий от f_y и определяемый по таблице 8; f_y – предел текучести, $\psi \leq -1$ для тех случаев, когда или сжимающее напряжение $\sigma \leq f_y$, или деформация растяжения $\varepsilon_y > f_y/E$, E – модуль упругости.

Таблица 3 – Определение коэффициента ε

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Для определения класса полок необходимо выполнения условия по данным таблицы 4.

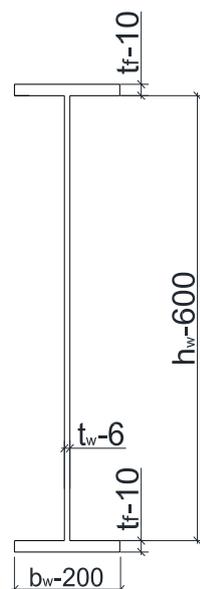
Таблица 4 – Максимальные отношения ширины к толщине для сжатых частей сечения полки

Класс	Участок в условиях изгиба	Участок, подвергнутый изгибу и сжатию	
		Сжатие на конце	Растяжение на конце
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)			
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ см. [111],	

Для усовершенствования существующих методов расчета гофрированных конструкций был разработан метод определения класса сечения гофрированной балки.

Пример определения класса сечения гофрированной балки

Для определения класса сечения балки при изгибе со сжатием была принята балка со следующими характеристиками ГС 480×80×6 (рисунок 39), где 480 мм – длина волны (L_r) и 80 мм – высота волны (f_r).



где $h_w = 600$ мм – высота гофрированной стенки; $t_w = 6$ мм – толщина гофрированной стенки; $b_f = 200$ мм – ширина полки; $t_f = 10$ мм – толщина полки

Рисунок 39 – Характеристика сечения сварной двутавровой балки ГС 480×80×6 мм

При толщине материала до 16 мм, т.е. $t_w = 6$ мм и $t_f = 10$ мм, предел текучести f_y для стали класса S235 составляет для стенки 235 Н/мм², $E=210000$ Н/мм². Минимальный радиус скругления r примем равным 10 мм.

По определенным эффективным параметрам в главе 3, рисунок 17 для ГС 480×50×6 мм эквивалентная толщина плоской стенки равна 33,3 мм, поэтому далее в расчете принимаем именно это значение.

Характеристика сечения

Для начала определяем класс поперечного сечения для наибольшего усилия чистого сжатия.

Классифицируем сечение при чистом сжатии:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1.$$

Свесы полок:

$$c_f = (b_f - t_w - 2r)/2 = (200 - 33,3 - 20)/2 = 73,35 \text{ мм};$$

$$c_f/t_f = 73,35/8 = 7,3$$

Предельное значение для полок класса 1 равно $9 \varepsilon = 9$

$$9 > 7,3 \text{ полка принадлежит к классу 1.}$$

Стенка – сжатый внутренний участок:

$$c_w = h - 2t_w - 2r = 600 - (2 \cdot 33,3) - (2 \cdot 10) = 513,4 \text{ мм}$$

$$c_w/t_w = 513,4/33,3 = 16,43$$

Предельное значение для стенок класса 1 на участке в условиях сжатия – $33 \varepsilon = 33$:

$33 > 16,43$, стенка принадлежит к классу 1.

Таким образом, в условиях сжатия, если стенка классифицируется по классу 1 и полки имеют класс 1, то общее поперечное сечение классифицируется как *сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой*.

Предельное значение для стенок класса 1 на участке в условиях изгиба – $72\varepsilon=72$

$72 > 16,43$, стенка принадлежит к классу 1.

В условиях изгиба, если стенка классифицируется по классу 1, а полки имеют класс 1, то общее поперечное сечение классифицируется как *сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой*.

Выводы по 3 разделу

1. Теоретические исследования гофрированных стенок заключались в сравнительном анализе гофров волнообразного (Sin балка, Австрия), трапециевидного (Швеция) и треугольного (Казахстан) очертания различной толщины металла гофрированной стенки, начиная от 2 мм до 10 мм, а также плоской стенки аналогичных толщин. Для выполнения наиболее точного анализа принимались во внимание максимальное количество показателей. Например, предельная ширина панели гофра, толщина стенки гофра, гибкость панели стенки, предельная высота панели гофра, предельная длина балки, момент инерции, приведенный момент инерции, минимальный момент сопротивления, приведенный минимальный момент сопротивления, радиус инерции, расход стали на 1 п.м. и т.д. Полученные данные и результаты сравнительного анализа были сведены в таблицы Приложения Ж, а также визуально отображены на графиках (рисунки 17 – 37). Для определения требуемых показателей по выбору наиболее оптимального вида гофра была принята компьютерная методика. Использовался программный комплекс Тонус на базе вычислительного комплекса Scad.

2. Одним из главных показателей экономической эффективности балок с гофрированными стенками является расход стали. Наиболее эффективными по виду гофр являются трапециевидные гофры. Однако более близкими по форме, принципу работы и изготовлению для балок с треугольным очертанием гофр казахстанского изготовления являются балки с синусоидальным видом гофра. Именно по этим причинам сравнительный анализ всех рассмотренных балок выполнен по данным двух типов гофров: Sin балка и ГС Казахстан. Балка ГС Швеция не принималась во внимание при детальном сравнительном анализе, в виду отсутствия данных о геометрических стенках толщиной более 3 мм.

3. При толщине гофрированной стенки 2 мм из рассмотренного перечня балок (Sin балка, ГС Казахстан) при сравнении наиболее эффективной по рассмотренным параметрам Sin балки $155 \times 40 \times 2$ и ГС Каз $280 \times 45 \times 2$ имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 2% эффективнее балка ГС Каз $280 \times 45 \times 2$, по эквивалентной толщине плоской стенки на 1% эффек-

тивнее Sin балка 155×40×2, по приведенному моменту сопротивления более эффективной оказывается балка ГС Каз 160×50×2, что на 7% лучше показателя балки ГС Каз 280×45×2, однако по расходу стали она 13% менее эффективна, чем балка ГС Каз 280×45×2.

4. При толщине гофрированной стенки 3 мм из рассмотренного перечня балок (Sin балка, ГС Швеция, ГС Казахстан) наиболее эффективной является балка с трапециевидным гофром шведского производства, а при сравнении наиболее эффективных по рассмотренным параметрам Sin балки 155×43×3 и ГС Каз 140×45×3 имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 62% эффективнее балка ГС Каз 140×45×3 и по эквивалентной толщине плоской стенки также на 14% эффективнее ГС Каз 140×45×3; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является балка ГС Каз 140×45×3, что на 84% лучше показателя Sin балки 155×40×3, по расходу стали она на 8% также превосходит показатель Sin балки 155×40×3.

5. При толщине гофрированной стенки 4 мм из рассмотренного перечня балок (Sin балка, ГС Казахстан) наиболее эффективной является балка ГС Каз 480×80×4. При сравнении с наиболее эффективной Sin балкой 155×46×4 имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 270% эффективнее балка ГС Каз 480×80×4 и по эквивалентной толщине плоской стенки на 36% также эффективнее балка ГС Каз 480×80×4; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является эта же балка ГС Каз 480×80×4, что на 209% лучше показателя Sin балки 155×46×4, по расходу стали она 7,5% также эффективнее.

6. При толщине гофрированной стенки 5 мм из рассмотренного перечня балок (ГС Казахстан) наиболее эффективными являются балки ГС Каз 480×80×5 и ГС Каз 520×80×5. При сравнении их характеристик имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 1% эффективнее балка ГС Каз 480×80×5 и по эквивалентной толщине плоской стенки на 2,6% эффективнее также балка ГС Каз 480×80×5; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является балка ГС Каз 520×80×5, что на 21,7% лучше показателя балки ГС Каз 480×80×5 и по расходу стали она на 6% также превосходит показатель балки ГС Каз 480×80×5.

7. При толщине гофрированной стенки 6 мм из рассмотренного перечня балок (ГС Казахстан) наиболее эффективными являются балки БГС Каз 480×80×6, ГС Каз 520×80×6 и ГС Каз 280×45×6. При сравнении их характеристик имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции балка ГС Каз 480×80×6 на 1,5% эффективнее балки ГС 520×80×6 и на 323% эффективнее балки ГС Каз 280×45×6, а по эквивалентной толщине плоской стенки балка ГС Каз 480×80×6 на 9,2% эффективнее балки ГС Каз 520×80×6 и на 48,7% эффективнее балки ГС Каз 280×45×6; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является балка ГС Каз 280×45×6, что на 15,5% лучше показателя балки ГС Каз 480×80×6 и на 11,7% лучше показателя балки ГС Каз 520×80×6, а по расходу балка стали балка ГС Каз 520×80×6 на 12,6% лучше показателя балки ГС Каз 280×45×6 и на 12,7% лучше показателя балки ГС Каз 480×80×6.

8. При толщине гофрированной стенки 8 мм из рассмотренного перечня балок (ГС Казахстан) наиболее эффективными являются балки ГС Каз 480×80×8, ГС Каз 520×80×8. При сравнении их характеристик имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 0,08% эффективнее балка ГС Каз 480×80×8, а по эквивалентной толщине плоской стенки на 0,02% эффективнее балка ГС Каз 520×80×8; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является балка ГС Каз 480×80×8, что на 0,01% лучше показателя балки ГС Каз 520×80×8, а по расходу стали на 0,6% лучше показатель балки ГС Каз 520×80×8.

9. При толщине гофрированной стенки 10 мм из рассмотренного перечня балок (ГС Казахстан) наиболее эффективными являются балки ГС Каз 480×80×10 и ГС Каз 520×80×10. При сравнении их характеристик имеем следующие показатели: по приведенному моменту инерции на 0,8% эффективнее балка ГС Каз 480×80×10, а по эквивалентной толщине плоской стенки на 0,03% эффективнее балка ГС Каз 520×80×10; по приведенному моменту сопротивления более эффективной является балка ГС Каз 520×80×10, что на 0,07% лучше показателя балки ГС Каз 480×80×10 и по расходу стали она 0,06% лучше показатель балки ГС Каз 480×80×10.

10. В общем, для гофрированных стенок различной толщины при детальном сравнительном анализе полученных данных Sin балки и ГС Казахстан наиболее эффективными для повышения устойчивости являются следующие параметры балок ГС Казахстан со следующими параметрами гофров:

- для гофрированной стенки толщиной 2 мм – ГС Каз 280×45×2/30;
- для гофрированной стенки толщиной 3 мм – ГС Каз 140×45×3/5 t_w ;
- для гофрированной стенки толщиной 4 мм – ГС Каз 480×80×4/30;
- для гофрированной стенки толщиной 5 мм – ГС Каз 480×80×5/30;
- для гофрированной стенки толщиной 6 мм – ГС Каз 480×80×6/30;
- для гофрированной стенки толщиной 8 мм – ГС Каз 480×80×8/30;
- для гофрированной стенки толщиной 10 мм – ГС Каз 480×80×10/30.

11. Так как немаловажной задачей является классификация поперечного сечения с гофрированной стенкой, при этом определяются границы, при достижении которых несущая способность поперечного сечения ограничивается потерей местной устойчивости. Таким образом, в условиях сжатия, если стенка классифицируется по классу 1 и полки имеют класс 1, то общее поперечное сечение классифицируется как сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой. А в условиях изгиба, если стенка классифицируется по классу 1, а полки также имеют класс 1, то общее поперечное сечение классифицируется как сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой.

12. Близкими по форме, принципу работы и изготовлению для балок с треугольным очертанием гофров казахстанского изготовления являются балки с синусоидальным видом гофра. Именно поэтому в дальнейшем необходимо проведение численного эксперимента между данными двумя сечениями, для определения влияния формы сечения, толщины стенок гофров на такие параметры, как приведенный момент инерции и приведенный момент сопротивления.

13. Нужно дополнительно изучить влияние размера и толщины окаймления и параллельных парных ребер жесткости на увеличение несущей способности балок с гофрированной стенкой, ослабленных отверстиями.

14. Необходимо определить влияние размера и шага отверстий на деформативность балки с гофрированной стенкой. Также следует определить наиболее эффективное месторасположение отверстий по высоте балки.

15. Для увеличения несущей способности балки с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями и уменьшения ее деформативности, необходимо совершенствование имеющегося единственного способа усиления отверстий предложенного в нормативных документах Республики Казахстан.

4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЯМИ

Данная глава предполагает анализ имеющихся конструктивных решений, а также поиск новых, определение их свойств и особенностей.

Для решения поставленной задачи будут использованы современные компьютерные программные комплексы, которые способны автоматизировать процесс создания расчетной и геометрической схемы балки с гофрированной стенкой, создавать виртуальную модель в трехмерном изображении, уменьшить риски механических ошибок, сократить сроки создания компьютерной модели балки с гофрированной стенкой, в том числе ослабленной отверстиями.

Сегодня рынок систем автоматизированного проектирования (САПР) может предложить широкий выбор мощных программных комплексов, имеющих функции геометрического моделирования и анализа результатов расчета.

Лучшим решением для решения задач механики твердого тела методом численных алгоритмов является метод конечных элементов (МКЭ). Большинство проведенных теоретических и практических исследований с применением МКЭ обосновывают и подтверждают эффективность и правильность полученных результатов.

4.1 Цели и задачи математического моделирования

4.1.1 Методика планирования эксперимента

Методика определения требуемых показателей для численного эксперимента принята компьютерная, в частности, использовался программный комплекс Тонус на базе вычислительного комплекса Scad.

Для выполнения численного эксперимента были приняты два вида сечения гофров: волнообразный (синусоидальный) (Sin балка, Австрия) и треугольный (ГС Казахстан).

Исследуемые сечения были приняты с одинаковым шагом и высотой гофра. Также был учтен возможный допустимый допуск (отклонение от высоты) при их производстве, равный ± 2 мм.

Толщина гофра для обоих типов сечения принята 2 и 3 мм.

В таблице 5 приведены геометрические характеристики стенок толщиной 2 и 3 мм для обоих типов гофров, а в таблице 6 характеристики внутренних сечений стенок синусоидального и треугольного очертания гофров со стенками толщиной 2 и 3 мм.

Таблица 5 – Геометрические характеристики гофрированных стенок синусоидального и треугольного очертания гофр со стенками толщиной 2 и 3 мм

Наименование показателя	Толщина стенки 2 мм			Толщина стенки 3 мм			Толщина стенки 2 мм			Толщина стенки 3 мм		
	Sin 155x40 x2/30	Sin 155x4 2x2/3 0	Sin 155x38 x2/30	Sin 155x4 3x3/3 0	Sin 155x4 5x3/3 0	Sin 155x4 1x3/3 0	ГС Каз. 155x4 0x2/3 0	ГС Каз. 155x4 2x2/3 0	ГС Каз. 155x3 8x2/3 0	ГС Каз. 155x4 3x3/3 0	ГС Каз. 155x4 5x3/3 0	ГС Каз. 155x4 1x3/3 0
Длина полуволны гофра L_r , мм	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5	77,5
Высота волны гофра f_r , мм	40	42	38	43	45	41	40	42	38	43	45	41
Радиус скругления r , мм	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	87,2	88,1	86,3	88,6	89,6	87,7	87,2	88,1	86,3	88,6	89,6	87,7
Толщина стенки t_w , мм	2	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3
Гибкость панели стенки h_w/t_w	43,6	44,1	43,2	29,5	29,9	29,2	43,6	44,1	43,2	29,5	29,9	29,2
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	130	130	130	195	195	195	130	130	130	195	195	195
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	110	110	110	165	165	165	110	110	110	165	165	165
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	654	661	647	665	672	658	654	661	647	665	672	658
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	825	825	825	1238	1238	1238	825	825	825	1238	1238	1238
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	19623	19834	19421	19942	20164	19727	19623	19834	19421	19942	20164	19727
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	24750	24750	24750	37125	37125	37125	24750	24750	24750	37125	37125	37125

Таблица 6 – Характеристика внутренних сечений гофрированных стенок синусоидального и треугольного очертания гофров со стенками толщиной 2 и 3 мм

Наименование показателя	Толщина стенки 2 мм			Толщина стенки 3 мм			Толщина стенки 2 мм			Толщина стенки 3 мм		
	Sin 155x40 x2/30	Sin 155x42 x2/30	Sin 155x38 x2/30	Sin 155x43 x3/30	Sin 155x45 x3/30	Sin 155x41 x3/30	ГС Каз. 155x40 x2/30	ГС Каз. 155x42 x2/30	ГС Каз. 155x38 x2/30	ГС Каз. 155x43 x3/30	ГС Каз. 155x45 x3/30	ГС Каз. 155x41 x3/30
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155
Площадь сечения, см ²	3,420	3,44	3,36	5,270	5,340	5,250	3,530	3,560	3,470	5,320	5,40	5,260
Длина гофрированной стенки, мм	162,60	172,10	168,25	175,75	178,05	174,90	176,35	178,00	173,55	177,45	180,00	175,35
Момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴	5,93	6,21	5,03	9,60	10,76	9,150	5,92	6,45	5,01	9,64	10,92	8,60
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1 см ² площади	1,734	1,805	1,497	1,822	2,015	1,743	1,677	1,812	1,444	1,812	2,022	1,635
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	1,32	1,34	1,22	1,35	1,42	1,32	1,30	1,350	1,20	1,35	1,42	1,28
Минимальный момент сопротивления по оси V , см ³	1,30	1,34	1,17	2,02	2,12	1,94	1,73	1,80	1,61	2,64	2,79	2,50
Приведенный минимальный момент сопротивления по оси V см ³ / 1 см ² площади	0,380	0,390	0,348	0,383	0,397	0,370	0,490	0,506	0,464	0,496	0,517	0,475
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1 кг массы стали гофра	220,88	229,96	190,70	232,05	256,68	222,02	213,64	230,80	183,92	230,83	257,61	208,28
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1 кг массы стали гофра	48,42	49,62	44,35	48,82	50,57	47,07	62,43	64,41	59,11	63,22	65,82	60,55

Численный эксперимент проводился с целью определения приведенных моментов инерции $I_y^{пр}$ и приведенных моментов сопротивления $W_y^{пр}$ и при изменении таких факторов, как тип гофрированной балки и толщина гофрированной стенки t_w .

Для обработки данных численных экспериментальных исследований использовался двухфакторный дисперсионный анализ [141]:

План эксперимента показан в таблице 7.

Таблица 7 – План эксперимента

Параметр	Тип гофрированной балки	Толщина гофрированных стенок (t_w)	
		2 мм	3 мм
Модель	Sin балка, база \pm допуск	155×42×2	155×45×3
		155×40×2	155×43×3
		155×38×2	155×41×3
	Балка ГС, база \pm допуск	155×42×2	155×45×3
		155×40×2	155×43×3
		155×38×2	155×41×3

Математическая модель эксперимента имеет вид формулы 44:

$$X_{ij} = \mu + P_i + G_j + PG_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad 44$$

где X_{ij} – измеряемая величина;

μ – истинное среднее совокупности, из которой получена выборка;

P_i – соответствует уровню изменения типа гофра « T_i » $i=1,2$ Sin балка, Балка ГС Казахстан;

G_j – соответствует значению толщины гофра « t_w » $j=2,3$;

ε_{ij} – соответствует случайной ошибке в ячейке ij , где $k=1,2$.

Эксперимент типа 2×2 с тремя исходными данными для каждого варианта расчета. Результаты дисперсионного анализа [142] по изучению типа гофрированной стенки ($t_w = 2$ и 3 мм) приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Численные значения приведенного момента инерции ($I_y^{пр}$) и приведенного момента сопротивления для дисперсионного анализа, эксперимента ($t_w = 2$ и 3 мм)

Параметр	Тип гофрированной балки	Толщина гофрированных стенок (t_w)		$\sum T_i$	$\sum T_i^2$
		2мм	3мм		
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $см^4 / 1кг$ массы стали гофра, $I_y^{пр}$	Sin балка, база \pm допуск	220,881	232,055	452,936	220,881
		190,704	222,020	412,724	190,704
		230,800	257,610	488,410	230,800
	Балка ГС, база \pm допуск	213,640	230,830	444,47	213,640
		183,920	208.280	392,200	183,920
		1269,911	1407.481	2677,392	1269,911
	$\sum T_i$	270778,050	332056,070	602834,110	270778,050
$\sum T_i^2$	49,6220	50,574	100,200	49,622	
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , $см^4 / 1кг$ массы стали гофра, $W_y^{пр}$	Sin балка, база \pm допуск	48,423	48,828	97,250	48,423
		44,359	47,073	91,430	44,359
		64,410	65,820	130,230	64,410
	Балка ГС, база \pm допуск	62,430	63,220	125,650	62,430
		59,110	60,550	119,660	59,110
		328,354	336.065	664,419	328,354
	$\sum T_i$	18315,000	19153,110	37468,110	18315,000
$\sum T_i^2$	220,881	232,055	452,936	220,881	

Таблица 9 – Результаты дисперсионного анализа двухфакторного эксперимента для определения критерия F_1

Параметр	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1\text{кг}$ массы стали гофра, $I_y^{\text{пр}}$	Толщина гофрированной стенки	1	1577,120	1577,120
	Тип гофрированной балки	1	61,798	61,798
	A × B – взаимодействие	1	0,012	0,012
	Ошибка E_{ij}	4	3826,19	956,55
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1\text{кг}$ массы стали гофра, $W_y^{\text{пр}}$	Толщина гофрированной стенки	1	4,950	4,950
	Тип гофрированной балки	1	625,94	625,94
	A × B – взаимодействие	1	0,010	0,010
	Ошибка E_{ij}	4	49,490	12,370

Поскольку толщины гофрированной стенки, как факторы экспериментов фиксированы, все проверки статистической значимости основаны на F – статистике, в знаменателе которой стоит средний квадрат ошибки.

Используя полученные в таблице 9 результаты, проверяем следующие статистические гипотезы:

- $T_i = 0$ для всех i т.е. нет влияния типа гофрированной балки:

 - для приведенных моментов инерции ($I_y^{\text{пр}}$):

$$F_{1,4} = \frac{61,798}{956,550} = 0,064 < 7,71$$
 – гипотеза верна;
 - для приведенных моментов сопротивления ($W_y^{\text{пр}}$):

$$F_{1,4} = \frac{625,94}{12,370} = 50,61 > 21,2$$
 – гипотеза отвергается, величина значима при 1% уровне значимости.
- $T_i = 0$ для всех i , т.е. нет влияния толщины гофрированной стенки (t_w):

 - для приведенных моментов инерции ($I_y^{\text{пр}}$):

$$F_{1,4} = \frac{1577,120}{956,550} = 1,65 < 7,71$$
 – гипотеза верна;

– для приведенных моментов сопротивления (W_y^{pp}):

$$F_{1,4} = \frac{4,950}{12,370} = 0,40 < 7,71 \text{ – гипотеза верна.}$$

3. $T_i=0$ для всех i , т.е. нет влияния взаимодействия обоих факторов:

– для приведенных моментов инерции:

$$F_{1,4} = \frac{0,012}{12,37} = 0,0009 < 7,71 \text{ – гипотеза верна;}$$

– для приведенных моментов сопротивления (W_y^{pp}):

$$F_{1,4} = \frac{0,010}{12,37} = 0,0008 < 7,71 \text{ – гипотеза верна.}$$

Результаты анализа показали, что изменение типа гофрированных балок (Sin и ГС) оказывает статистически значимое влияние только на изменение величин приведенных моментов сопротивления (W_y^{pp}), при этом не оказывая статистически значимого влияния на изменения приведенных моментов инерции (I_y^{pp}): Тогда как изменение толщины гофрированной стенки (t_w) не оказывает влияние на изменение всех рассматриваемых параметров: приведенных моментов сопротивления (W_y^{pp}), приведенных моментов инерции (I_y^{pp}) для обоих типов балок.

Также отсутствует влияние взаимодействия двух факторов как для приведенных моментов инерции (I_y^{pp}), так и для приведенных моментов сопротивления (W_y^{pp}).

По выводам, сделанным выше, можно утверждать, что с переходом Республики Казахстан на европейские нормы проектирования Eurocode, а также с внедрением гармонизированной версии в нормы проектирования проектирование, методика, предложенная для расчета балок с гофрированной стенкой синусоидального очертания гофров (Sin балка), в некоторых случаях, может быть применена к балкам с гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров (ГС балка), также и наоборот.

4.4 Сравнительный анализ экспериментальных, теоретических и данных компьютерного моделирования балки с гофрированной стенкой

4.4.1 Двухопорная балка с гофрированной стенкой, ослабленная тремя технологическими отверстиями

В 1983 г. в Казахском отделении ЦНИИПроектстальконструкция разрабатывались рабочие чертежи покрытия одноэтажного производственного здания, в котором были применены стальные стропильные балки с тонкой гофрированной стенкой. Экспериментальное исследование проводилось на двухопорной балке с гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров, без отверстий и с тремя технологическими отверстиями. Для обеспечения пропускания различного рода коммуникаций в стенках балок были предусмотрены три круглых отверстия диаметром $0,5h_w$. Так как отсутствует точная методика расчета гофрированных балок с ослаблениями, то для применения в практике строительства балок с тонкими гофрированными стенками, ослабленными отверстиями, требуются соответствующие натурные испытания.

Принятые в эксперименте геометрические параметры, материал, нагрузки и пограничные условия представлены ниже.

Испытание проводилось на крупномасштабных моделях (М 1:3) сварных двутавровых балок постоянного сечения (пояса – 200×10 мм, стенки – $840 \times 1,9$ мм) пролетом 8400 мм. Первая балка без отверстий Б–1. В стенке второй балки Б–2 образованы три круглых отверстия диаметром $0,5h_w$, кромки которых были подкреплены элементами жесткости из полосовой стали сечением 85×3 мм. Максимально допустимый прогиб балки принят $1/220l$ по табл. 19 СНиП 2.01.07–85 Нагрузки и воздействия и равняется 38,2 мм. Общий вид балок и их геометрических размеров приведен на рисунке 40.

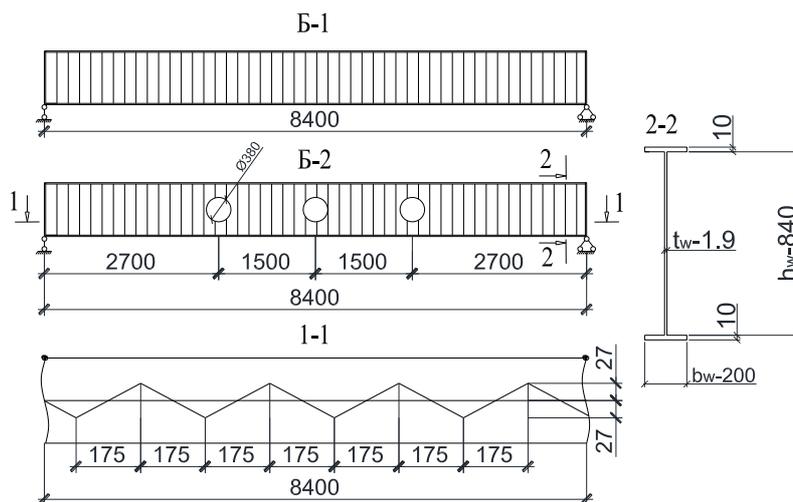


Рисунок 40 – Геометрические размеры сечений моделей

Гофры стенки треугольного очертания с закруглениями в вершинах имели длину волны l_r – 350 мм и высоту волны f_r – 54 мм. Материал стенки и поясов сталь ВСт3псб по ГОСТ 380–71 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие технические требования [143]. Балки были изготовлены в лаборатории по испытанию металлических конструкций. Общий вид гофрированной балки, ослабленной отверстиями, приведен на рисунке 41. Сварные швы выполнялись ручной электросваркой.

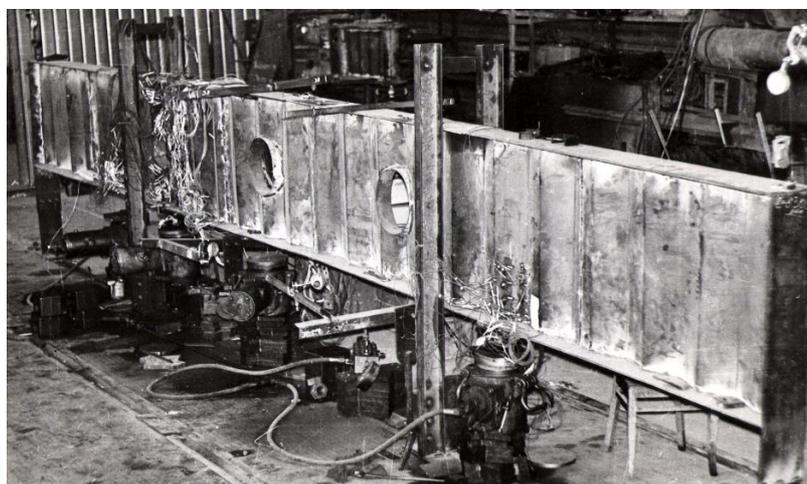


Рисунок 41 – Общий вид балки во время испытаний

Загружение балок осуществлялось гидравлическими домкратами ДГО–100 через стальные пластины – 100×20 мм длиной $l = 200$ мм.

Схемы нагружения представлены на рисунке 42.

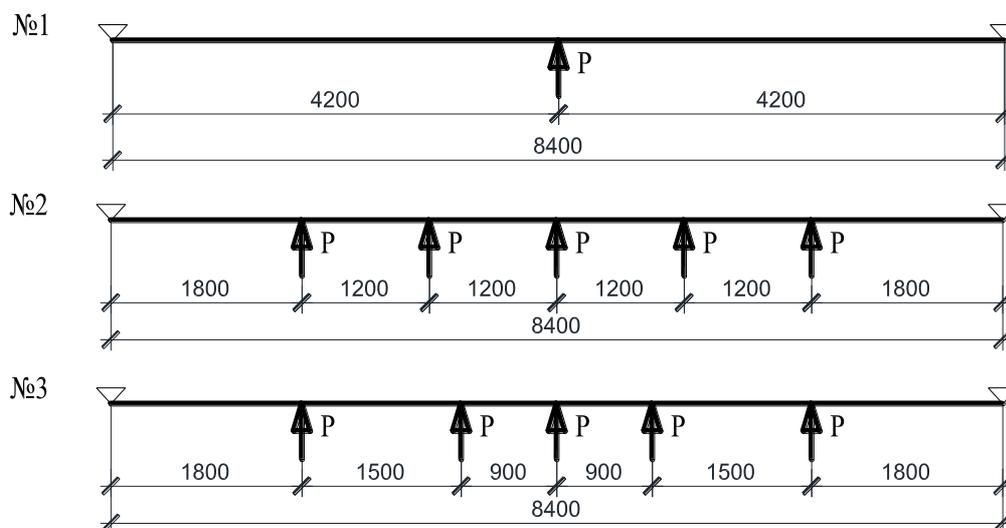


Рисунок 42 – Схемы нагружения модели

Наряду с изучением напряженного состояния элементов балки изучалась также и ее деформативность, поскольку сведений о деформативности балок с тонкими гофрированными стенками немного, а интерес у них в практике строительства особый.

Выполненные ранее испытания дают возможность провести сопоставительный анализ деформативности балок (рисунок 43) одинакового поперечного сечения с отверстиями в стенке и без них при одинаковых условиях работы, а также проверить данные компьютерного моделирования данных испытаний в программном комплексе ЛИРА–САПР 2017, с целью дальнейшего использования данной программы как основной при проведении дальнейших численных исследований сварной двутавровой балки, ослабленной технологическими круглыми отверстиями с разным шагом и диаметром.



а) балка Б-1 с гофрированной стенкой без отверстий; б) балка Б-2 с гофрированной стенкой с тремя отверстиями

Рисунок 43 – Модель балок в программном комплексе ЛИРА–САПР

В таблице 10 представлены величины изгибающих моментов в середине пролета M_3 , поперечных сил у опор Q_3 , напряжений в поясах σ_{max} , напряжений в стенке τ_{max} , экспериментальных прогибов Y_3 , компьютерных прогибов Y_K и теоретических Y_T прогибов, по данным СН РК 5.04–08–2004 Пособие по проектированию стальных конструкций [144]. Также представлены значения прогибов балки Б-1 без отверстий, экспериментальных прогибов Y_3^* и компьютерных

Y_K^* значений прогибов в середине балки Б–2 с отверстиями для схем загрузки №1,2,3.

Таблица 10 – Результаты полученных экспериментальных данных

№ схемы загрузки	Суммарная нагрузка на балку $\sum P$, кН	Изгибающий момент в середине пролета M_3 , кНм	Поперечная сила у опор Q_3 , кН	Напряжение в поясах σ_{max} Мпа	Напряжение в стенке τ_{max} Мпа	Прогиб (мм)				
						Y_T Б–1	Y_3 Б–1	Y_K Б–1	Y_3^* Б–2	Y_K^* Б–2
1	40	84	20	49.4	12.5	3.41	4	4.28	3.44	5.15
2	150	207	75	121.8	47.0	12.8	9.5	12	12.69	13.6
2	200	276	100	162.4	62.7	17.07	13.2	16	17.07	18.1
3	250	360	125	211.8	78.3	21.35	18.6	20.5	25.1	23.8
3	311	434	156	255.1	94.7	26.56	23.2	25.5	36.44	29.6
3	330	344	165	261.2	103.4	28.18	24.9	27	37.31	31.4

Также в таблице 11 приведены отношения Y_3/Y_K , Y_3/Y_T , Y_K/Y_T , Y_3^*/Y_K^* , Y_3^*/Y_3 и указана величина относительного прогиба l/Y_T , l/Y_3 , l/Y_3 , l/Y_K , l/Y_3^* и l/Y_K^* .

Таблица 11 – Анализ полученных данных по стенке без ослабления и с ослаблением

Суммарная нагрузка на балку $\sum P_3$, кН	Прогиб (мм), разница расчетов (%)									
	Y_3/Y_K	Y_3/Y_T	Y_K/Y_T	Y_3^*/Y_K^*	Y_3^*/Y_3	l/Y_T	l/Y_3	l/Y_K	l/Y_3^*	l/Y_K^*
40	0,93	1,17	1,26	0,80	0,86	2463,3	2100,0	1962,6	2441,8	1631,1
150	0,79	0,74	0,94	1,06	1,34	656,25	884,21	700,00	661,94	617,65
200	0,83	0,77	0,94	1,07	1,29	492,09	636,36	525,00	492,09	464,09
250	0,91	0,87	0,96	1,22	1,35	393,44	451,61	409,76	334,66	352,94
311	0,91	0,87	0,96	1,43	1,57	316,27	362,07	329,41	230,52	283,78
330	0,92	0,88	0,96	1,38	1,50	298,08	337,35	311,11	225,14	267,52

Анализ данных таблицы 11 показывает, что деформативность испытываемой балки Б–2 в линейной области работы ($P_3 \approx 0,65-0,7P_3, max$) на 20–30% больше аналогичной балки Б–1 без ослабления. Величина относительного прогиба составляет $1/430l$. При дальнейшем нагружении работа балки Б–2 становилась нелинейной, при этом ее деформативность на 35–50% превышала деформативность балки без отверстия Б–1. Предельное состояние балки наступило при прогибах, равных $1/225l$.

В гофрированных стенках балки Б–2 возможно образование отверстий с максимальным диаметром равным половине высоты стенки для пропуска технологического оборудования только на участках с фактическими касательными

напряжениями $\tau_{cp} \leq 0.4\tau_{кр}$, где $\tau_{кр}$ – критические напряжения устойчивости гофрированных пластинок при сдвиге.

Сопоставительный анализ экспериментальных и компьютерных данных по прогибам Y_e^* и Y_c^* для балки В–2 с отверстиями при схемах нагружения №2 и №3 дает расхождение в прогибах в среднем не более 6%. Полученные данные позволяют использовать программу ЛИРА САПР как основную, при проведении дальнейших численных исследований сварных двутавровых балок, ослабленных отверстиями с разным шагом и диаметром.

Напряженное состояние гофрированной стенки в зоне отверстия является отдельным вопросом, требующим дополнительных исследований, учитывающих соотношение диаметра отверстия и высоты стенки балки, шага отверстий, жесткости элемента, подкрепляющего контур отверстия, а также расположение отверстия по высоте стенки ближе к сжатому или растянутому поясу.

4.5 Параметрическое исследование гофрированной стенки балки с гофрами треугольного очертания с различным диаметром и шагом отверстий

В данной главе рассматривается влияние шага и диаметра отверстий в гофрированной стенке двутавровой балки с треугольным очертанием гофров на несущую способность от действия поперечных нагрузок. В предыдущих работах многих исследований проблема отверстий в стенках балок решалась в основном в балках с плоскими стенками, в то время как исследования в отношении отверстий в гофрированных стенках имеются в очень ограниченном количестве. К тому же отсутствует необходимая нормативная литература по проектированию балок с гофрированной стенкой, ослабленной технологическими отверстиями.

По проделанному выше анализу необходимо проверить влияние диаметра ($0,25h_w$, $0,5h_w$, $0,75h_w$) и шага отверстий ($2d$, $3d$ и $4d$) на работу гофрированной стенки с треугольным очертанием гофров с тремя и двумя отверстиями [145].

Численное параметрическое исследование проводилось на сварной гофрированной балке с треугольным очертанием гофров, модель и испытание которой описаны в пункте 4.1.1. Численное моделирование балок выполнялось при помощи программы общего назначения для анализа конечных элементов ЛИРА–САПР 2017, включающего в себя требования, предъявляемые к конструкциям в соответствии с Eurocode 3 Part 1.5–Plated Structural Elements. Данная программа может использоваться для решения различного задач, начиная от простого линейного анализа и заканчивая сложным нелинейным анализом, который требует учета различных производственных отклонений и погрешностей материалов. Параметрическое исследование проводилось для балки, с учетом различных размеров отверстий в стенке балки, расстояний между отверстиями, с усилением и без усиления отверстия, а также гофрированной балки без отверстия. Рассматривалась способность стенки балки с отверстием и без отверстия выдерживать нагрузку и выполнялась оценка влияния гибкости стенки.

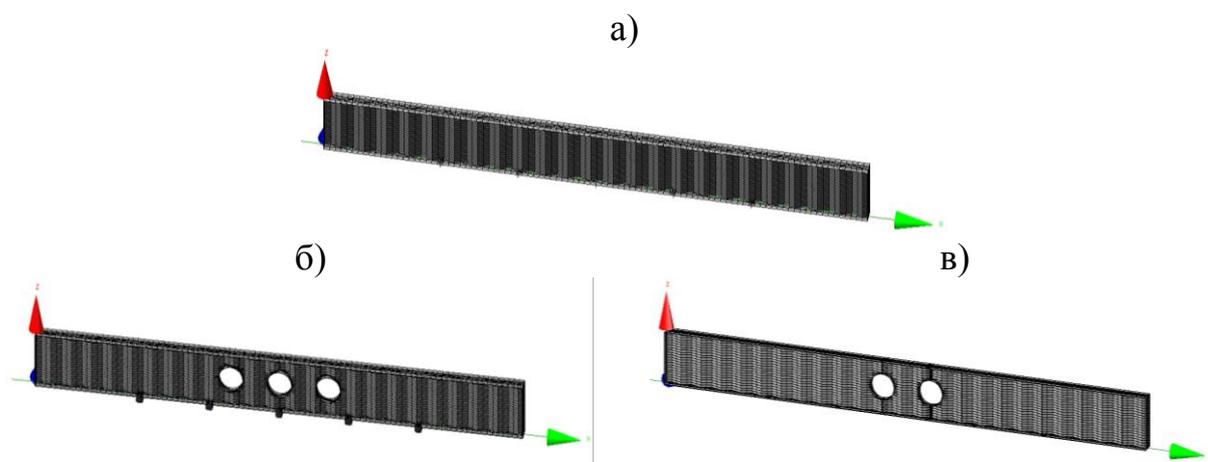
При компьютерном моделировании использовалась балка высотой стенки h_w – 840 мм и толщиной стенки t_w – 1,9 мм. Гофры стенки треугольного очер-

тания длиной волны l_r – 350 мм и высотой волны f_r – 54 мм (рисунок 44). Материал для стенки и поясов принята сталь С 245.



Рисунок 44 – Схема треугольного очертания, принятая при компьютерном моделировании

Модели конечных элементов, принятые для балок с треугольным очертанием гофров с отверстиями и без отверстий приведены на рисунке 45.



- а) сварная двутавровая балка без отверстия;
- б) сварная двутавровая балка, ослабленная тремя отверстиями;
- в) сварная двутавровая балка, ослабленная двумя отверстиями

Рисунок 45 – Модели, принятые для анализа балок

Сварная двутавровая балка постоянного сечения (пояса – 200×10 мм, стенки – $840 \times 1,9$ мм) пролетом 8400 мм. В стенке балки образованы три и два круглых отверстия диаметром $0,25h_w$, $0,5h_w$, $0,75h_w$. В первом случае отверстия выполняются без окаймления листовой сталью. Во втором случае отверстия по периметру подкрепляются окаймлением по своей площади равной площади отверстия, то есть для отверстия диаметром $0,25h_w$ ширина окаймления принята 50 мм, для отверстия диаметром $0,5h_w$ – 110 мм, для отверстия диаметром $0,75h_w$ – 180 мм. Толщина окаймления во всех случаях равна $t = 3$ мм. В третьем случае отверстия подкрепляются окаймлением, а также парными вертикальными ребрами жесткости из полосовой стали толщиной $t = 10$ мм и шириной равной ширине окаймления, по всей высоте стенки. Две торцевые пластины приняты толщиной $t = 20$ мм.

Приложение нагрузки осуществляется через пластины длиной $l = 200$ мм, $t = 20$ мм, находящиеся в непосредственном контакте с поверхностью полки. Нагрузка передается в пяти точках по направлению снизу – вверх. Нагрузка при-

ложена в центре балки, а также на расстоянии от центра в оба направления по 1,2 м (рисунок 46).

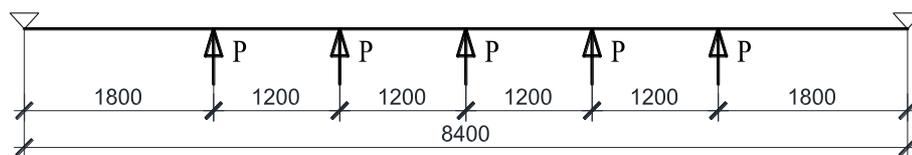


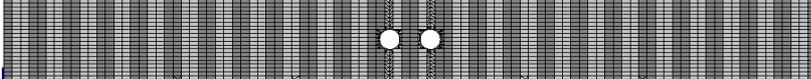
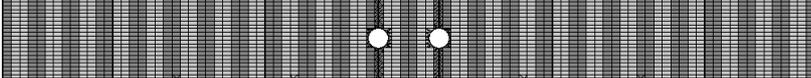
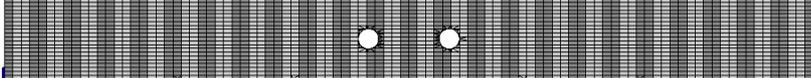
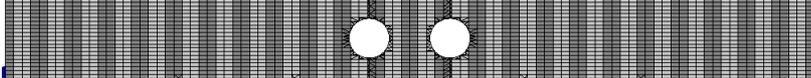
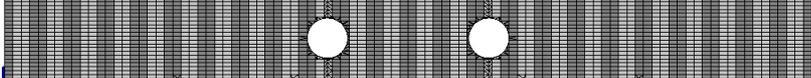
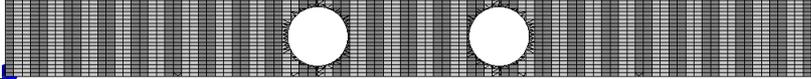
Рисунок 46 – Схема нагружения моделей для параметрического исследования

В исследуемых балках центр отверстий расположен ровно посередине высоты стенки. Расстояние между центрами отверстий принято $2d$, $3d$ и $4d$. В балке с тремя отверстиями одно из отверстий имеет постоянное место расположения в центре балки на расстоянии 4,2 м от левой и правой опоры до центра отверстия. В балке с двумя отверстиями, отверстия расположены от центра в разные стороны на расстоянии друг от друга $2d$, $3d$ и $4d$. Геометрические параметры отверстий приняты круглой формы. Эскизы балок с тремя отверстиями представлены в таблице 12, а эскизы балок с двумя отверстиями представлены в таблице 13.

Таблица 12 – Балки с тремя отверстиями с различным диаметром и шагом между отверстиями

Диаметр отверстий	Шаг отверстий	Эскиз
$0,25h_w$	$2d$	
$0,25h_w$	$3d$	
$0,25h_w$	$4d$	
$0,5h_w$	$2d$	
$0,5h_w$	$3d$	
$0,5h_w$	$4d$	
$0,75h_w$	$2d$	
$0,75h_w$	$3d$	
$0,75h_w$	$4d$	

Таблица 13. Балки с двумя отверстиями с различным диаметром и шагом между отверстиями

Диаметр отверстий	Шаг отверстий	Эскиз
$0,25h_w$	$2d$	
$0,25h_w$	$3d$	
$0,25h_w$	$4d$	
$0,5h_w$	$2d$	
$0,5h_w$	$3d$	
$0,5h_w$	$4d$	
$0,75h_w$	$2d$	
$0,75h_w$	$3d$	
$0,75h_w$	$4d$	

Для принятых моделей значение устойчивости к деформации было принято 245 МПа, модуль упругости $E = 206000$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3, расчетное сопротивление сдвигу $R_s = 142,1$ МПа. Для модели балки длиной 8400 мм максимально допустимый прогиб равен $1/220l$ или 38,2 мм. Нагружение (Q) моделей ведется от 50 кН до 350 кН. Шаг нагружения – 50 кН.

Численное параметрическое исследование балки с треугольным очертанием гофра включает в себя анализ 56 моделей конечных элементов и состоит из двух этапов. На первом этапе исследуются балки с тремя отверстиями. Из 28 моделей балок 1 модель балки без отверстия, а 27 моделей имеют в стенке три отверстия различных диаметров и располагаются они на различном расстоянии друг от друга. На втором этапе исследуются балки с двумя отверстиями, в том же количестве и с идентичными характеристиками отверстий. Толщина гофрированной стенки в обоих случаях равна $t_w = 1,9$ мм.

4.5.1 Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без отверстий и с отверстиями в стенке с различным диаметром и шагом отверстий

В таблицу 14 сведены результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без отверстий и с тремя отверстиями в стенке без подкрепления и с подкреплением отверстий, с различным диаметром и шагом отверстий в числителе, а в знаменателе – с двумя отверстиями [146].

Таблица 14 – Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без отверстий и с отверстиями в стенке

Вид балки	Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Подкрепление отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
					50	100	150	200	250	300	350
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балка без отверстий	M-1	–	–	–	4,01	8,01	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
Балки с отверстиями	<u>M-2</u> M-2-2	2d	0,25h _w	без подкрепления	<u>4,030</u>	<u>8,06</u>	<u>12,1</u>	<u>16,1</u>	<u>20,1</u>	<u>24,2</u>	<u>28,2</u>
					4,036	8,073	12,11	16,15	20,18	24,22	28,26
Балки с отверстиями	<u>M-3</u> M-3-2	2d	0,5h _w	без подкрепления	<u>5,654</u>	<u>11,31</u>	<u>16,96</u>	<u>22,62</u>	<u>28,27</u>	<u>33,93</u>	<u>39,68</u>
					7,14	14,28	21,42	28,56	35,70	42,84	49,98
Балки с отверстиями	<u>M-4</u> M-4-2	2d	0,75h _w	без подкрепления	<u>24,50</u>	<u>49,0</u>	<u>73,50</u>	<u>98,0</u>	<u>122,0</u>	<u>147,0</u>	<u>171,0</u>
					8,594	17,19	25,78	34,37	42,97	51,56	60,16
Балки с отверстиями	<u>M-5</u> M-5-2	2d	0,25h _w	окаймление	<u>4,02</u>	<u>8,04</u>	<u>12,0</u>	<u>16,0</u>	<u>20,0</u>	<u>24,10</u>	<u>28,10</u>
					4,022	8,044	12,07	16,09	20,11	24,13	28,16
Балки с отверстиями	<u>M-6</u> M-6-2	2d	0,5h _w	окаймление	<u>4,54</u>	<u>9,07</u>	<u>13,6</u>	<u>18,10</u>	<u>22,7</u>	<u>27,21</u>	<u>31,75</u>
					4,77	9,54	14,30	19,07	23,84	28,60	33,37
Балки с отверстиями	<u>M-7</u> M-7-2	2d	0,75h _w	окаймление	<u>8,13</u>	<u>16,30</u>	<u>24,40</u>	<u>32,50</u>	<u>40,70</u>	<u>48,8</u>	<u>56,90</u>
					5,503	11,01	16,51	22,01	27,51	33,02	38,52
Балки с отверстиями	<u>M-8</u> M-8-2	2d	0,25h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>3,99</u>	<u>7,99</u>	<u>11,95</u>	<u>15,96</u>	<u>19,90</u>	<u>24,0</u>	<u>27,96</u>
					4,018	8,036	12,05	16,07	20,09	24,11	28,14
Балки с отверстиями	<u>M-9</u> M-9-2	2d	0,5h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>4,32</u>	<u>8,635</u>	<u>12,95</u>	<u>17,27</u>	<u>21,59</u>	<u>25,9</u>	<u>30,22</u>
					4,44	8,870	13,31	17,75	22,19	26,62	31,06
Балки с отверстиями	<u>M-10</u> M-10-2	2d	0,75h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>6,38</u>	<u>12,75</u>	<u>19,13</u>	<u>22,50</u>	<u>31,88</u>	<u>38,30</u>	<u>44,60</u>
					4,90	9,80	14,70	19,60	24,50	29,40	34,30
Балки с отверстиями	<u>M-11</u> M-11-2	3d	0,25h _w	без подкрепления	<u>4,033</u>	<u>8,065</u>	<u>12,10</u>	<u>16,13</u>	<u>20,16</u>	<u>24,20</u>	<u>28,23</u>
					4,034	8,068	12,10	16,14	20,17	24,20	28,24
Балки с отверстиями	<u>M-12</u> M-12-2	3d	0,5h _w	без подкрепления	<u>8,114</u>	<u>16,23</u>	<u>24,34</u>	<u>32,46</u>	<u>40,57</u>	<u>48,69</u>	<u>56,80</u>
					7,148	14,29	21,44	28,59	35,74	42,88	50,03
Балки с отверстиями	<u>M-13</u> M-13-2	3d	0,75h _w	без подкрепления	<u>32,05</u>	<u>64,1</u>	<u>96,15</u>	<u>128,2</u>	<u>160,2</u>	<u>192,3</u>	<u>224,3</u>
					8,384	16,77	25,15	35,53	41,92	50,30	58,68

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балки с отверстиями	<u>М-14</u>	3d	0,25h _w	окаймление	<u>4,022</u>	<u>8,043</u>	<u>12,06</u>	<u>16,09</u>	<u>20,11</u>	<u>24,13</u>	<u>28,15</u>
	М-14-2				4,021	8,041	12,06	16,08	20,10	24,12	28,14
Балки с отверстиями	<u>М-15</u>	3d	0,5h _w	окаймление	<u>5,691</u>	<u>11,38</u>	<u>17,07</u>	<u>22,76</u>	<u>28,45</u>	<u>34,14</u>	<u>43,73</u>
	М-15-2				4,497	8,993	13,49	17,99	22,48	26,98	31,48
Балки с отверстиями	<u>М-16</u>	3d	0,75h _w	окаймление	<u>8,146</u>	<u>16,29</u>	<u>24,44</u>	<u>32,59</u>	<u>40,73</u>	<u>48,88</u>	<u>57,03</u>
	М-16-2				5,374	10,75	16,12	21,50	26,87	32,25	37,62
Балки с отверстиями	<u>М-17</u>	3d	0,25h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>3,995</u>	<u>7,99</u>	<u>11,99</u>	<u>15,95</u>	<u>19,98</u>	<u>23,96</u>	<u>27,97</u>
	М-17-2				4,018	8,035	12,05	16,07	20,09	24,11	28,12
Балки с отверстиями	<u>М-18</u>	3d	0,5h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>4,945</u>	<u>9,889</u>	<u>14,83</u>	<u>19,78</u>	<u>24,72</u>	<u>29,67</u>	<u>34,61</u>
	М-18-2				4,36	8,719	13,08	17,44	21,80	26,16	30,52
Балки с отверстиями	<u>М-19</u>	3d	0,75h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>8,142</u>	<u>16,28</u>	<u>24,43</u>	<u>32,57</u>	<u>40,71</u>	<u>48,85</u>	<u>57,00</u>
	М-19-2				4,715	9,429	14,14	18,86	23,57	28,29	33,00
Балки с отверстиями	<u>М-20</u>	4d	0,25h _w	без подкрепления	<u>4,044</u>	<u>8,087</u>	<u>12,13</u>	<u>16,17</u>	<u>20,22</u>	<u>24,26</u>	<u>28,30</u>
	М-20-2				4,018	8,036	12,05	16,07	20,09	24,11	28,13
Балки с отверстиями	<u>М-21</u>	4d	0,5h _w	без подкрепления	<u>13,20</u>	<u>26,40</u>	<u>39,60</u>	<u>52,81</u>	<u>66,01</u>	<u>79,21</u>	<u>92,41</u>
	М-21-2				5,691	11,38	17,07	22,76	28,46	34,15	39,84
Балки с отверстиями	<u>М-22</u>	4d	0,75h _w	без подкрепления	<u>25,10</u>	<u>50,19</u>	<u>75,29</u>	<u>100,4</u>	<u>125,5</u>	<u>150,6</u>	<u>175,7</u>
	М-22-2				24,19	48,38	72,57	96,76	120,9	145,1	169,3
Балки с отверстиями	<u>М-23</u>	4d	0,25h _w	окаймление	<u>4,027</u>	<u>8,054</u>	<u>12,08</u>	<u>16,11</u>	<u>20,13</u>	<u>24,16</u>	<u>28,19</u>
	М-23-2				4,012	8,024	12,04	16,05	20,06	24,07	28,08
Балки с отверстиями	<u>М-24</u>	4d	0,5h _w	окаймление	<u>5,179</u>	<u>10,36</u>	<u>15,54</u>	<u>20,71</u>	<u>25,89</u>	<u>31,07</u>	<u>36,25</u>
	М-24-2				4,44	8,88	13,32	17,76	22,20	26,64	31,08
Балки с отверстиями	<u>М-25</u>	4d	0,75h _w	окаймление	<u>10,96</u>	<u>21,92</u>	<u>32,89</u>	<u>43,89</u>	<u>54,81</u>	<u>65,77</u>	<u>76,73</u>
	М-25-2				7,853	15,70	23,56	31,41	39,26	47,11	54,97
Балки с отверстиями	<u>М-26</u>	4d	0,25h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>4,003</u>	<u>8,005</u>	<u>12,01</u>	<u>16,01</u>	<u>20,01</u>	<u>24,02</u>	<u>28,02</u>
	М-26-2				4,01	8,017	12,03	16,03	20,04	24,05	28,06
Балки с отверстиями	<u>М-27</u>	4d	0,5h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>4,813</u>	<u>9,627</u>	<u>14,44</u>	<u>19,25</u>	<u>24,07</u>	<u>28,88</u>	<u>33,69</u>
	М-27-2				4,288	8,576	12,86	17,15	21,44	25,73	30,01
Балки с отверстиями	<u>М-28</u>	4d	0,75h _w	окаймление и ребра жесткости	<u>7,832</u>	<u>15,66</u>	<u>23,49</u>	<u>31,33</u>	<u>39,16</u>	<u>46,99</u>	<u>54,82</u>
	М-28-2				6,122	12,24	18,36	24,49	30,61	36,73	42,85

4.5.1.1 Анализ работы балок с двумя отверстиями

На рисунке 47 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины модели балки М-1 при работе в упругой стадии, а в таблице 15 форма ее прогиба.

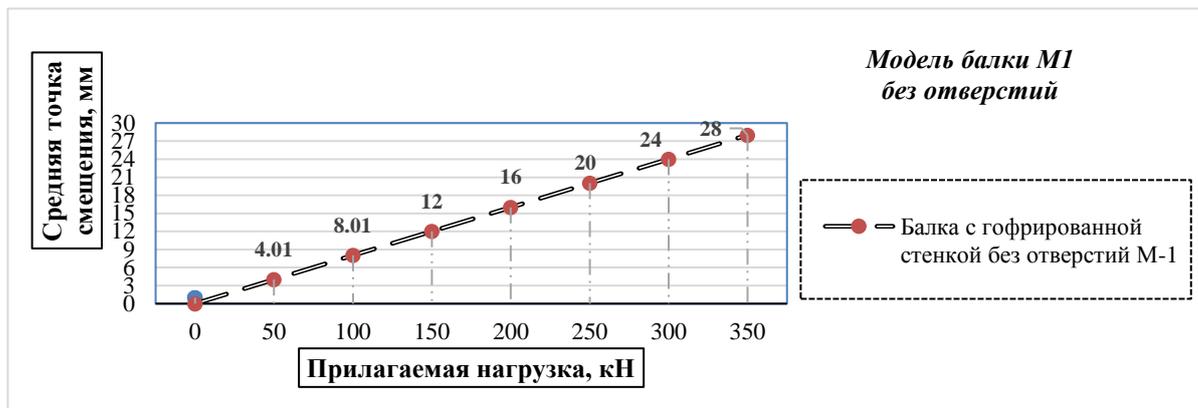


Рисунок 47 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в модели балки М-1

Таблица 15 – Форма прогиба модели балки с гофрированной стенкой без отверстия

Марка модели	Форма деформации модели балки без отверстий
М-1	

Анализируя полученные данные для модели балки М-1, видим, что максимально допустимый прогиб не достигнут и равен 28 мм.

На рисунке 48 показана зависимость «нагрузка–прогиб» середины моделей балок М-2-2, М-3-2 и М-4-2 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 16 – форма их прогиба.

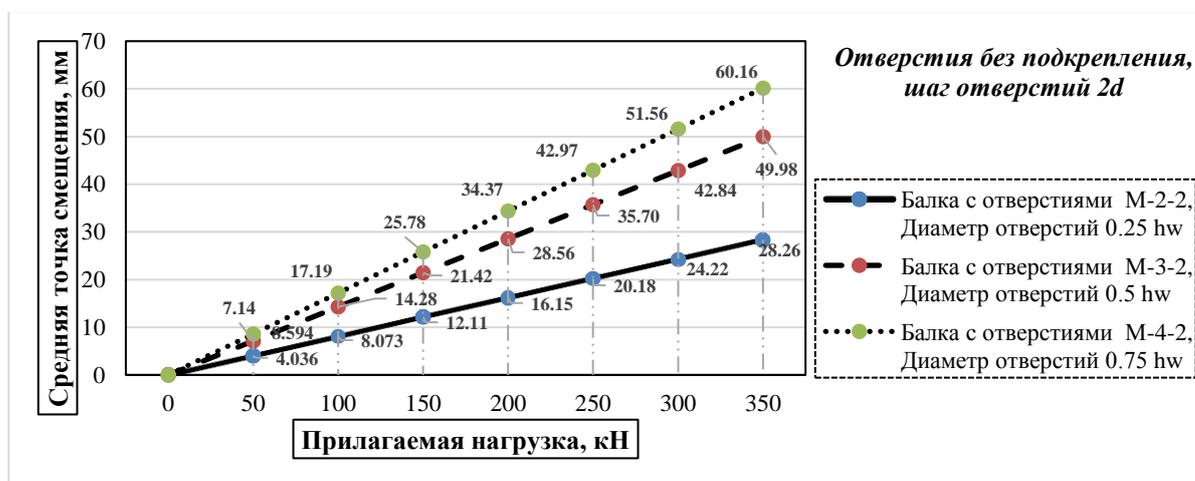
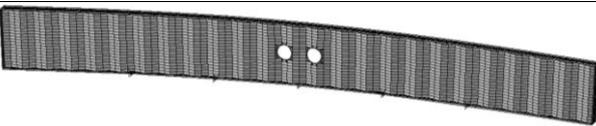
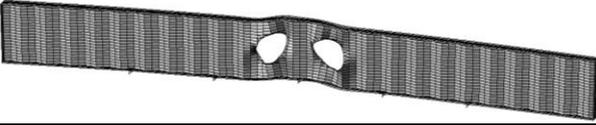
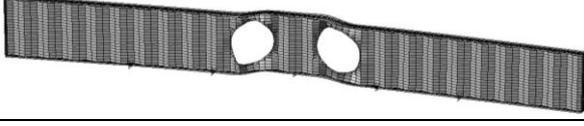


Рисунок 48 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М-2-2, М-3-2 и М-4-2

Таблица 16 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий без подкрепления, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-2	$0,25h_w$	
М-3	$0,5h_w$	
М-4	$0,75h_w$	

Для определения наиболее эффективного варианта модели гофрированной балки с тремя отверстиями было решено начать анализ моделей балок с гофрированной стенкой с шагом отверстий $2d$ без подкрепления отверстий. Полученные данные позволяют сделать выводы, о том, что, наиболее лучший результат показала модель М-2-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$, максимальные перемещения которой не превышают допустимых. Прогиб модели балки М-3-2 с шагом отверстия $2d$ больше, чем у модели балки М-2-2 на 76,85%, а прогиб модели балки М-4-2 с шагом отверстия $0,75h_w$ больше, чем у модели балки М-2-2 на 112,8%. У всех моделей наблюдается снижение значений сопротивления элементов к потере устойчивости с увеличением размера отверстий. Поэтому для уменьшения прогибов и увеличения устойчивости и прочности балки, ослабленной отверстиями, необходимо усиление отверстий.

На рисунке 49 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М-5-2, М-6-2 и М-7-2 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 17 – форма их прогиба.

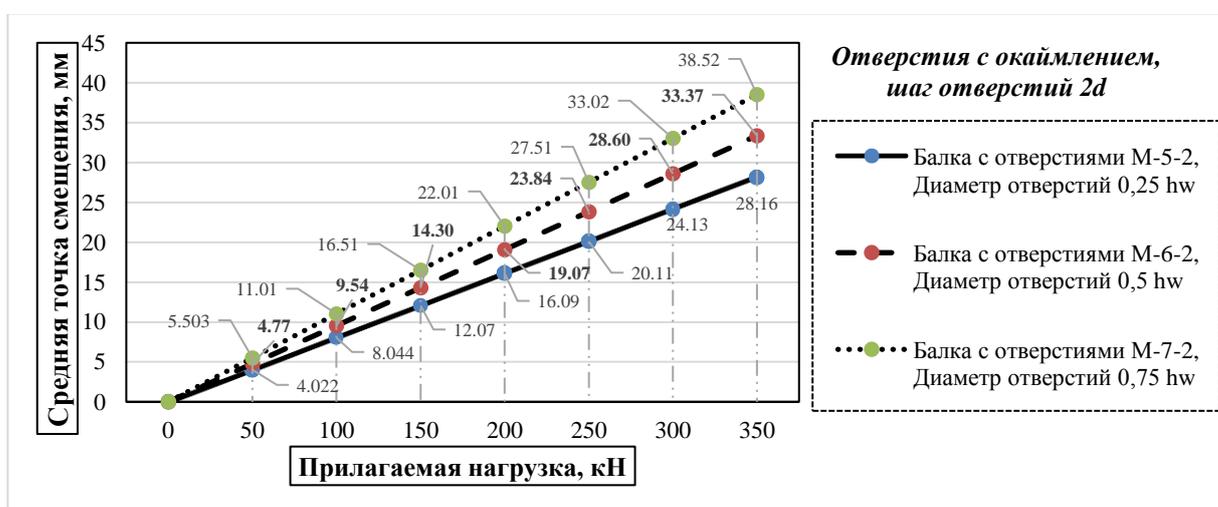
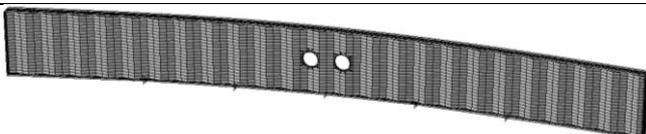
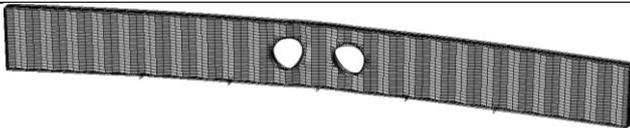
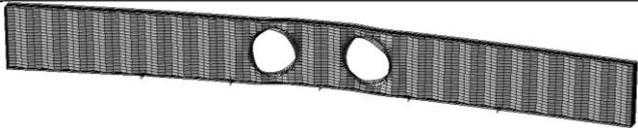


Рисунок 49 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М-5-2, М-6-2 и М-7-2

Таблица 17 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отверстий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-5-2	$0,25h_w$	
М-6-2	$0,5h_w$	
М-7-2	$0,75h_w$	

Анализ полученных данных моделей балок М-5-2, М-6-2 и М-7-2 с шагом отверстий $2d$ и окаймлением отверстий из полосовой стали толщиной 3 мм в целом показывает результаты лучше, чем без усиления отверстий. Так, например, на модель балки М-5-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление практически не повлияло. Для модели балки М-6-2 с диаметром отверстия $0,5h_w$, окаймление уменьшило прогиб на 33,24%, по сравнению с моделью балки М-3-2. Для модели балки М-7-2 с диаметром отверстия $0,75h_w$, усиление отверстия окаймлением показало следующие результаты, прогиб уменьшился по сравнению с моделью балки М-4-2 на 35,97%.

На рисунке 50 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М-8-2, М-9-2 и М-10-2 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 18 форма их прогиба.

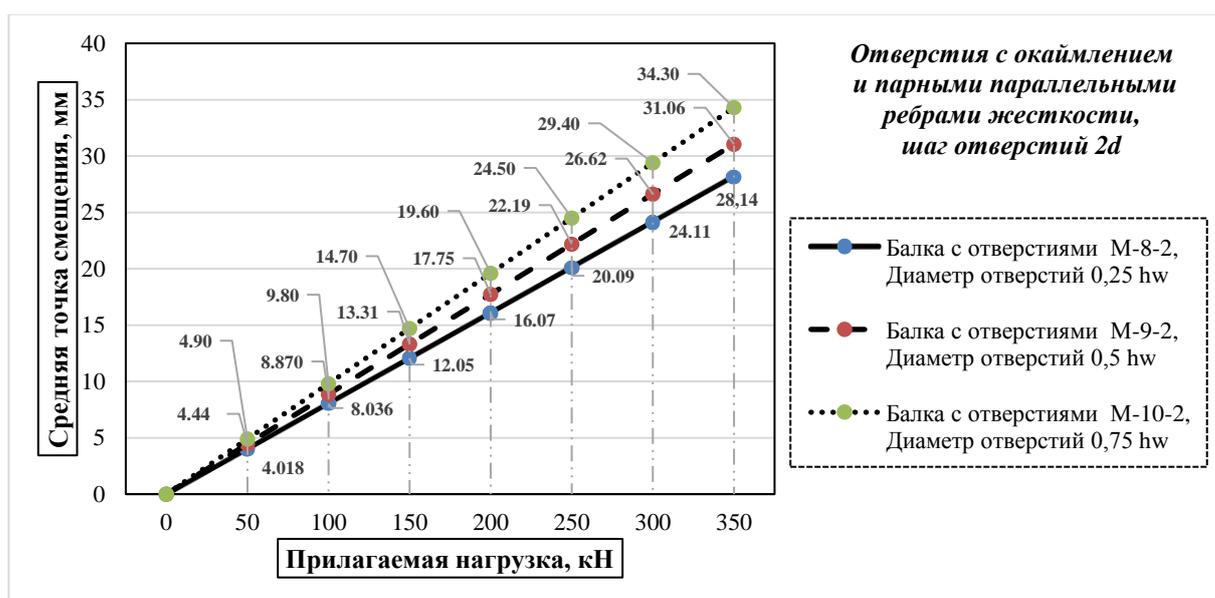
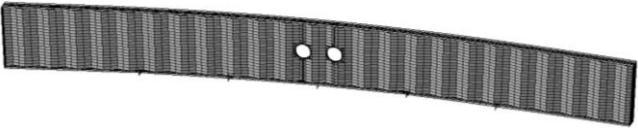
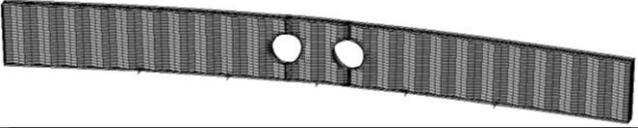
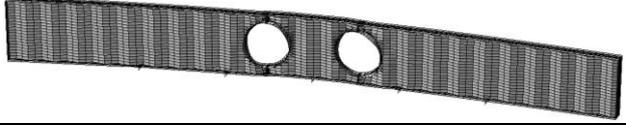


Рисунок 50 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М-8-2, М-9-2 и М-10-2

Таблица 18 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий, усиленных окаймлением и парными ребрами жесткости, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-8	$0,25h_w$	
М-9	$0,5h_w$	
М-10	$0,75h_w$	

Завершающим этапом по усилению моделей балок с шагом отверстий $2d$ стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребра жесткости была принята 10 мм. На модель балки М-8-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление парными ребрами практически никак не повлияло на прогиб, а вот для моделей балок М-9-2 и М-10-2 с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ показало лучшие результаты, так, например, у модели балки М-9-2 прогиб уменьшился на 6,92% по сравнению с моделью М-6-2 и на 37,86% уменьшился прогиб по сравнению с М-3-2, а у модели балки М-10-2 прогиб стал меньше 10,95%, чем у модели М-7-2.

На рисунке 51 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М-11-2, М-12-2 и М-13-2 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 19 форма их прогиба.

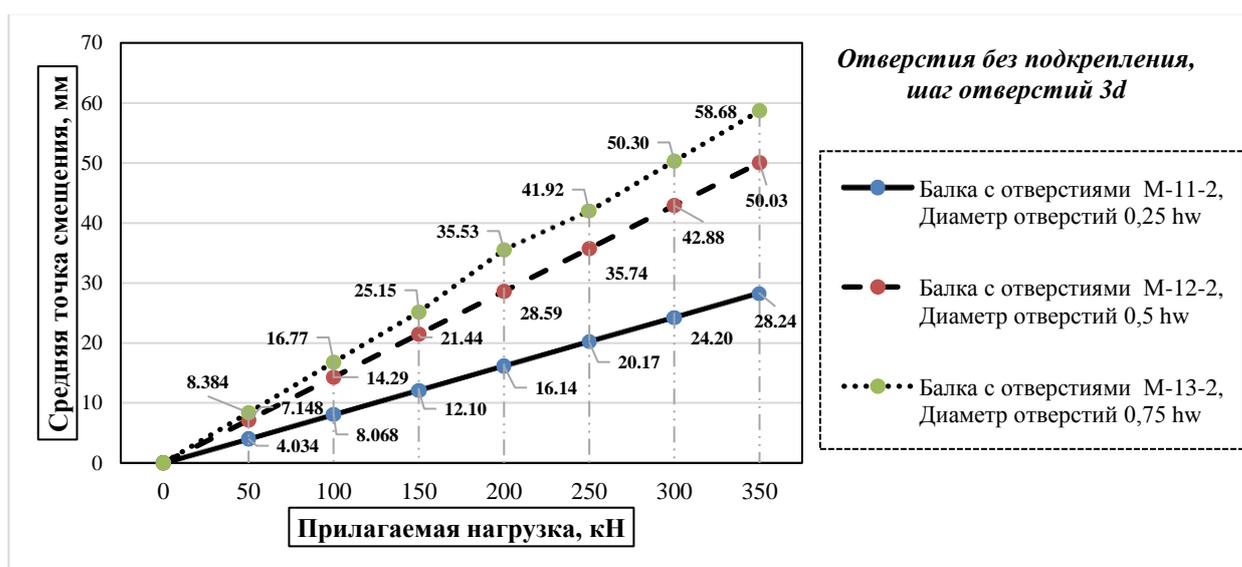
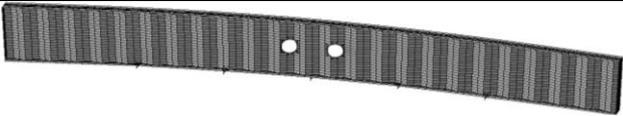
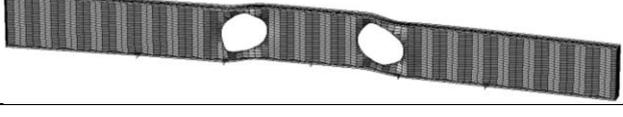


Рисунок 51 – График зависимости перемещения от прикладываемой нагрузки в моделях балок М-11-2, М-12-2 и М-13-2

Таблица 19 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий без подкреплений, шаг отверстий $3d$.

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
M-11-2	$0,25h_w$	
M-12-2	$0,5h_w$	
M-13-2	$0,75h_w$	

Анализируя полученные данные моделей балок M-11-2, M-12-2 и M-13-2, можно сделать вывод, что в целом прогибы и деформации моделей балок с шагом отверстий $3d$ без подкрепления отверстий больше, чем у аналогичных моделей балок M-2-2, M-3-2, M-4-2 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий равным $2d$. Деформации и перемещения моделей балок M-11-2 и M-2-2 с шагом отверстий $3d$ и $2d$ и диаметром отверстий $0,25h_w$, идентичны. Прогиб модели балки M-12-2 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ больше на 0,1%, чем для аналогичной модели балки M-3-2 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$. Результаты прогиба, полученные для модели балки M-13-2 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ меньше на 2,46%, чем для аналогичной модели балки M-4-2 с шагом отверстий $2d$ и диаметром $0,75h_w$.

На рисунке 52 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок M-14-2, M-15-2 и M-16-2 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 20 – форма их прогиба.

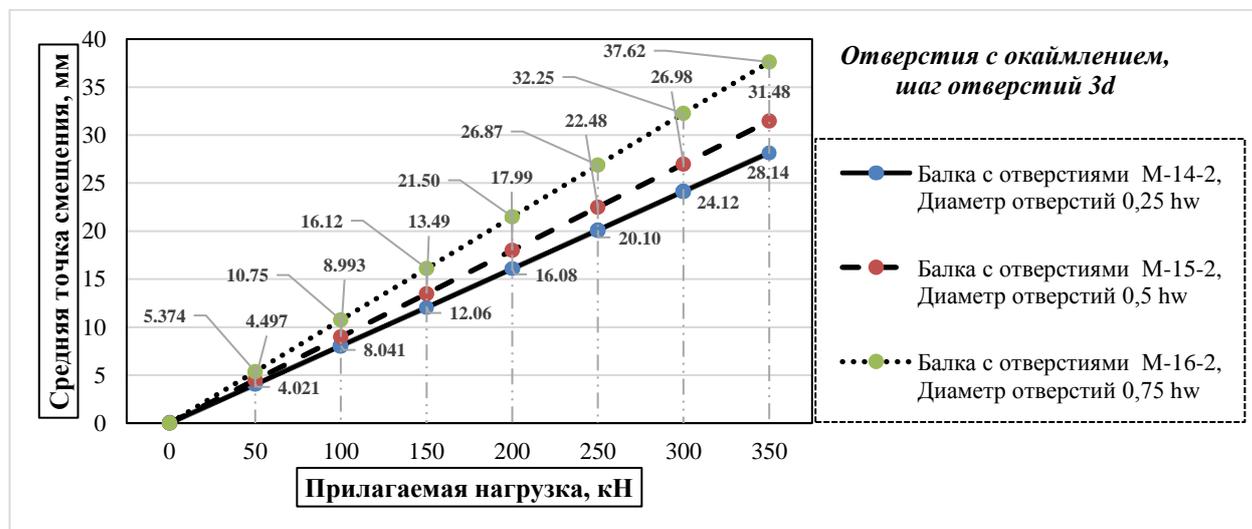
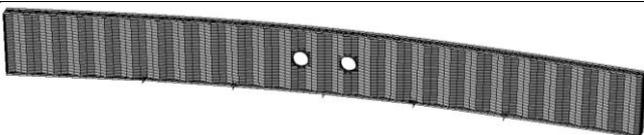
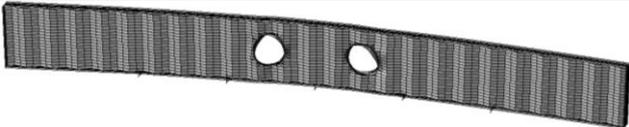
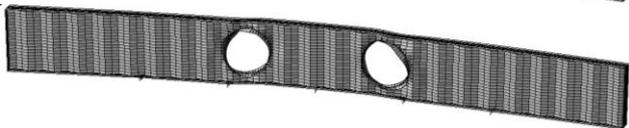


Рисунок 52 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок M-14-2, M-15-2 и M-16-2

Таблица 20 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $3d$

Марка модели	Диаметр отвл-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-14-2	$0,25h_w$	
М-15-2	$0,5h_w$	
М-16-2	$0,75h_w$	

После того как в работу моделей балок М-14-2, М-15-2 и М-16-2 с шагом отверстий $3d$ с было включено усиление отверстий окаймлением, были получены следующие результаты: как и в предыдущих случаях, поведение модели М-14-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$ и шагом отверстий $3d$ мало изменилось после усиления, а также, практически, не показало изменения по сравнению с полученными данными для модели М-5-2 с тем же диаметром, но шагом отверстий равным $2d$. А вот для остальных двух моделей М-15-2 и М-16-2 усиление окаймлением сказалось положительно и уменьшило их прогиб по сравнению с моделями балок М-12-2 и М-13-2, на 37,08% и 35,89% соответственно. Однако, полученный результат данных двух моделей балок М-15-2 и М-16-2 уступает по своим показателям аналогичным моделям балок М-9-2 и М-10-2 с шагом $2d$ на 1,35% и 9,67% соответственно.

На рисунке 53 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М-17-2, М-18-2 и М-19-2 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 21 – форма их прогиба.

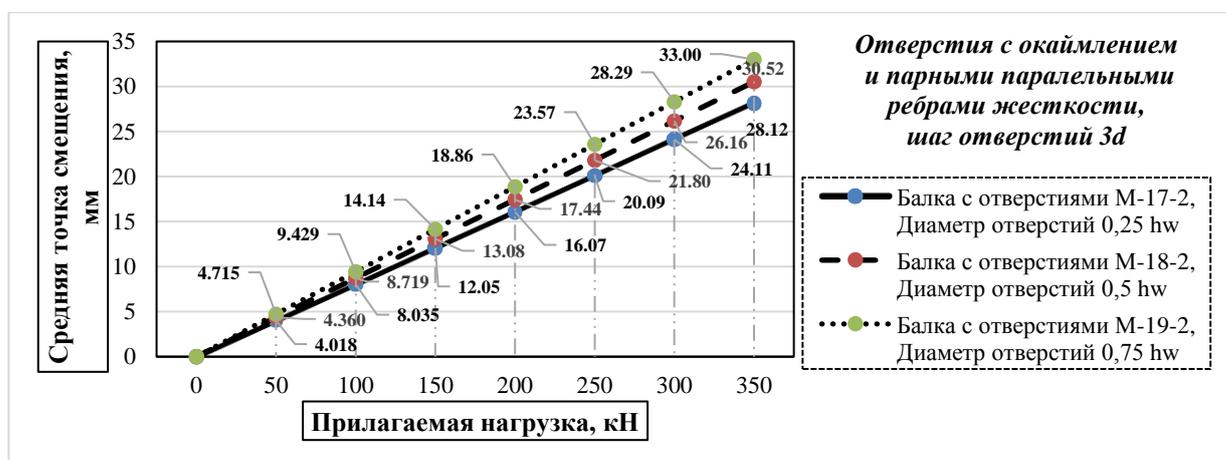
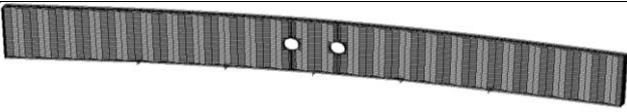
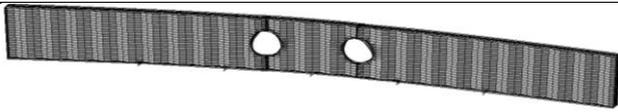
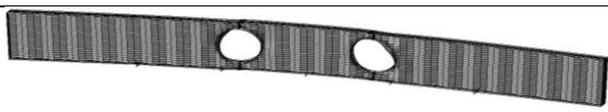


Рисунок 53 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М-17-2, М-18-2 и М-19-2

Таблица 21 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий, усиленных окаймлением и парными ребрами жесткости, шаг $3d$

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
M-17-2	$0,25h_w$	
M-18-2	$0,5h_w$	
M-19-2	$0,75h_w$	

Завершающим этапом по усилению моделей балок с шагом отверстий $3d$ стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребра жесткости была принята 10 мм. На модель балки M-17-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление парными параллельными ребрами практически никак не повлияло на прогиб, а вот для моделей балок M-18-2 и M-19-2 с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ показало следующие результаты, так, например, у модели балки M-18-2 прогиб меньше на 3,05%, чем у модели M-15-2 и на 34,04% меньше, чем прогиб модели M-12-2, а прогиб модели балки M-19-2 меньше на 12,29% чем у модели M-16-2 и на 43,77% меньше прогиба модели балки M-13. Полученный результат данных двух моделей балок M-18-2 и M-19-2 лучше по своим показателям аналогичных моделей балок M-9-2 и M-10-2 с шагом $2d$ на 1,74% и 3,8% соответственно.

На рисунке 54 показана зависимость «нагрузка–прогиб» середины моделей балок M-20-2, M-21-2 и M-22-2 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 22 – форма их прогиба.

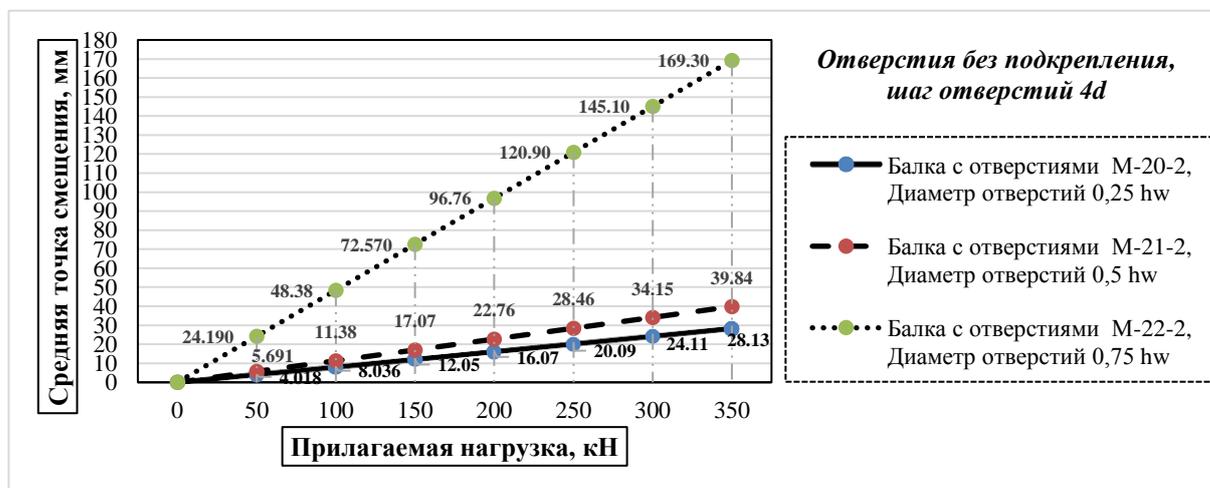
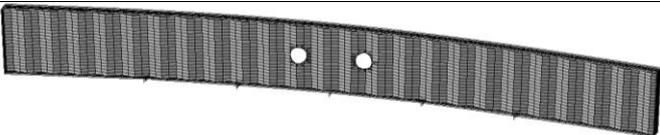
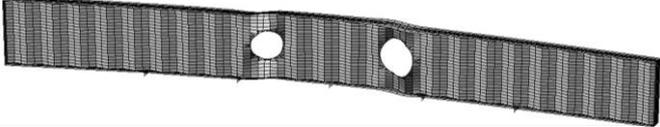
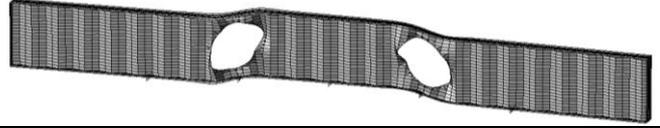


Рисунок 54 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок M-20-2, M-21-2 и M-22-2

Таблица 22 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий без подкреплений, шаг отверстий $4d$

Марка модели	Диаметр отверстий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-20-2	$0,25h_w$	
М-21-2	$0,5h_w$	
М-22-2	$0,75h_w$	

Анализируя полученные данные моделей балок М-20-2, М-21-2 и М-22-2, можно сделать вывод, что в целом прогибы и деформации моделей балок с шагом отверстий $4d$ без подкрепления отверстий больше, чем у аналогичных моделей балок М-11-2, М-12-2, М-13-2 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий, равным $3d$, и у аналогичных моделей балок М-2-2, М-3-2, М-4-2 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий равным $2d$. Деформации и перемещения моделей балок М-20-2, М-11-2 и М-2-2 с шагом отверстий $4d$, $3d$ и $2d$ и диаметром отверстий $0,25h_w$, идентичны. Прогиб модели балки М-21-2 с шагом отверстий $4d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ меньше на 20,37% чем для аналогичной модели балки М-12-2 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ и на 20,29 % меньше чем для аналогичной модели балки М-3-2 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$. Результаты прогиба, полученные для модели балки М-22-2 с шагом отверстий $4d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ больше на 188,51%, чем для аналогичной модели балки М-13-2 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ и на 181,41 % больше чем для аналогичной модели балки М-4-2 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$.

На рисунке 55 показана зависимость «нагрузка–прогиб» середины моделей балок М-23-2, М-24-2 и М-25-2 с шагом отверстий $4d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 23 – форма их прогиба.

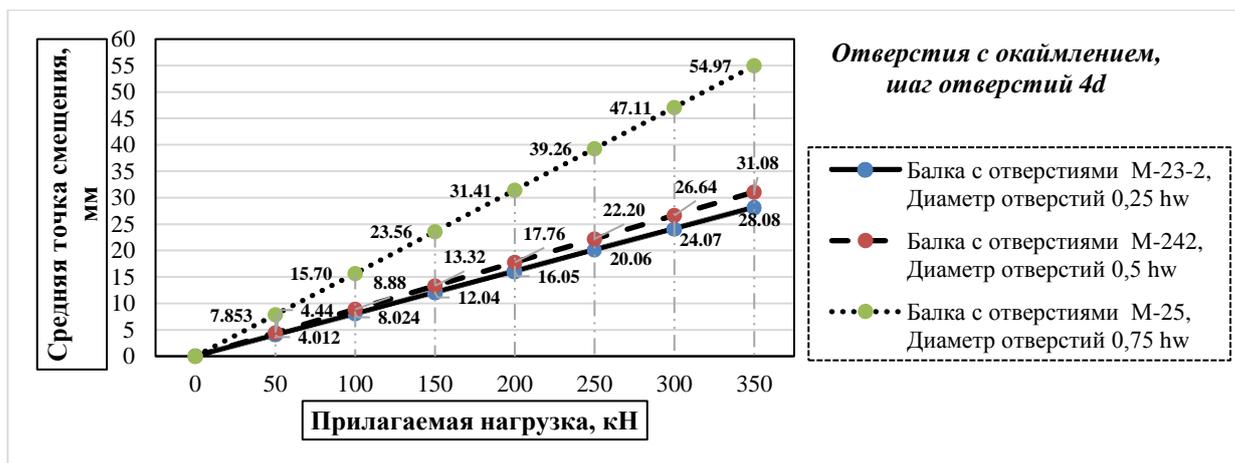


Рисунок 55 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М-23-2, М-24-2 и М-25-2

Таблица 23 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $4d$

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-23-2	$0,25h_w$	
М-24-2	$0,5h_w$	
М-25-2	$0,75h_w$	

После того как в работу моделей балок М-23-2, М-24-2 и М-25-2 с шагом отверстий $4d$ с было включено усиление отверстий окаймлением, были получены следующие результаты: как и в предыдущих случаях, поведение модели М-23-2 с диаметром отверстия $0,25h_w$ и шагом отверстий $4d$ мало изменилось после усиления, а также практически не показало изменения по сравнению с полученными данными для модели М-5-2 и М-14-2 того же диаметра, но шагом отверстий равным $2d$ и $3d$, соответственно. А вот для остальных двух моделей М-24-2 и М-25-2 усиление окаймлением сказалось положительно и уменьшило их прогиб по сравнению с моделями балок М-21-2 и М-22-2 на 21,99% и 67,54%, соответственно. Полученный результат данных модели балки М-24-2 лучше показателей аналогичной модели балки М-6-2 с шагом $2d$ на 6,87 %, а результат прогиба модели М-25-2 уступает показателям модели балки М-7-2 с шагом $2d$ на и 42,7 %. А при сравнении результатов моделей балок М-24-2 и М-25-2 с результатами аналогичных моделей балок М-15-2 и М-16-2 с шагом

3d, получим, что показатели прогиба модели балки М–24–2 лучше на 1,28% показателей модели балки М–15–2, но для модели балки М–25–2 результаты прогиба на 46,11% хуже результатов прогиба модели балки М–16–2.

На рисунке 56 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–26–2, М–27–2 и М–28–2 с шагом отверстий 4d при работе в упругой стадии, а в таблице 24 форма их прогиба.

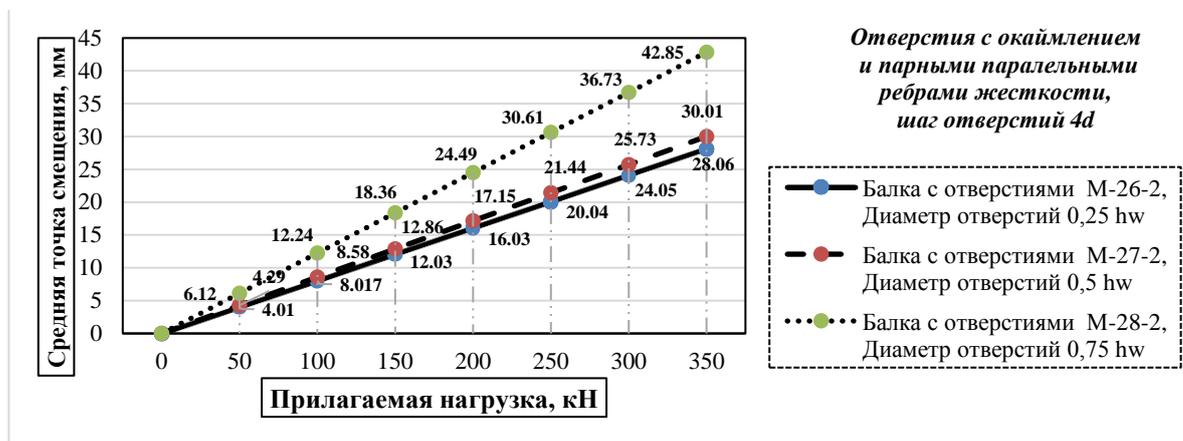


Рисунок 56 – График зависимости перемещения от прикладываемой нагрузки в моделях балок М–26–2, М–27–2 и М–28–2

Таблица 24 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром двух отверстий с окаймлением отверстия и парными параллельными ребрами жесткости, шаг отверстий 4d

Марка модели	Диаметр отверстий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–26–2	0,25h _w	
М–27–2	0,5h _w	
М–28–2	0,75h _w	

Завершающим этапом по усилению моделей балок с шагом отверстий 4d, так же, как и для отверстий с шагом 2d, 3d стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребра жесткости была принята 10 мм. И снова на модель балки М–26–2 с диаметром отверстия 0,25h_w, усиление парными ребрами практически не повлияло на прогиб. Для моделей балок М–27–2 и М–28–2 с отверстиями диаметром 0,5h_w и 0,75h_w усиление дало результаты лучше, так например, прогиб

модель балки М–27–2 меньше на 3,25%, чем прогиб модели балки М–24–2 и на 24,68% прогиб меньше модели балки М–21–2, а прогиб модели балки М–28 меньше на 22,05%, чем прогиб модели балки М–25 и на 74,7% меньше прогиба модели балки М–22–2. Полученный результат данных двух моделей балок М–27–2 и М–28–2 при сравнении с показателями аналогичных моделей балок М–18–2 и М–19–2 с шагом $3d$ прогиб на 1,68% меньше, и на 29,84% соответственно больше, а при сравнении с показателями аналогичных моделей балок М–9–2 и М–10–2 с шагом $2d$ прогиб на 3,39% меньше, и на 24,92%, соответственно, больше.

По проведенному анализу моделей балок с двумя отверстиями различного диаметра и шага можно сделать следующие основные выводы:

– наиболее эффективной моделью балки с диаметром отверстия $0,25h_w$ с шагом $2d$ стала модель балки М–8–2, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=478,2$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М–17–2, при нагрузке $Q_{max}=478$ кН; с шагом $4d$ – модель М–26–2, при нагрузке $Q_{max}=477,2$ кН. Все модели балок, отверстия которых укреплялись окаймлением листовой сталью и парными ребрами жесткости, расположенные по обе стороны отверстия, показали наилучшие результаты. При проектировании из перечисленных трех моделей балок, можно рекомендовать все модели, с диаметром отверстия $0,25h_w$, шагом $2d$, $3d$ и $4d$, так как разница между ними менее 1%. Не смотря на то, что влияние усиления отверстий на прогиб моделей балок с диаметром отверстий $0,25h_w$ минимально, рекомендуется выполнять их с окаймлением.

– наиболее эффективной моделью балки с диаметром отверстия $0,5h_w$ с шагом $2d$ стала модель балки М–9–2, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=442,4$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М–18–2, при нагрузке $Q_{max}=386,3$ кН; с шагом $4d$ – модель М–27–2, при нагрузке $Q_{max}=396,8$ кН. Все указанные модели, отверстия которых укреплялись окаймлением листовой сталью и парными ребрами жесткости, расположенные по обе стороны отверстия, показали наилучшие результаты. При проектировании из перечисленных трех моделей балок, можно рекомендовать все модели, с диаметром отверстия $0,5h_w$, шагом $2d$, $3d$ и $4d$, так как разница между ними не более 3,5 %.

– наиболее эффективной моделью балки с диаметром отверстия $0,75h_w$ с шагом $2d$ стала модель балки М–10–2, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=299,6$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М–19–2 при нагрузке $Q_{max}=270$ кН; с шагом $4d$ модель М–28–2 при нагрузке $Q_{max} = 202$ кН. Модель М–28–2, отверстия которой укреплялись окаймлением листовой сталью и парными ребрами жесткости, расположенными по обе стороны отверстия, показала, что предел текучести стали по касательному напряжению, был достигнут. При проектировании из оставшихся двух моделей балок, можно рекомендовать модель М–10–2 и М–19–2, с диаметром отверстия $0,75h_w$, шагом $2d$ и $3d$, так как разница между ними не более 4 %.

В итоге, наиболее оптимальным диаметром для двух отверстий в стенке балки при проектировании может стать диаметр отверстия $0,25h_w$ и $0,5h_w$ с шагом отверстий $2d$, $3d$ и даже $4d$. Для повышения несущей способности гофрированной балки, ослабленной двумя отверстиями обязательно необходимо усиление отверстия окаймлением листовой сталью, а также подкрепление отверстия парными вертикальными ребрами жесткости. В случае острой необходимости отверстия с диаметром $0,75h_w$ рекомендуется применение стали с более высокими прочностными характеристиками для увеличения несущей способности и уменьшения трудоемкости ее изготовления.

4.5.1.2 Анализ работы балок с тремя отверстиями

На рисунке 57 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–2, М–3 и М–4 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 25 – форма их прогиба.

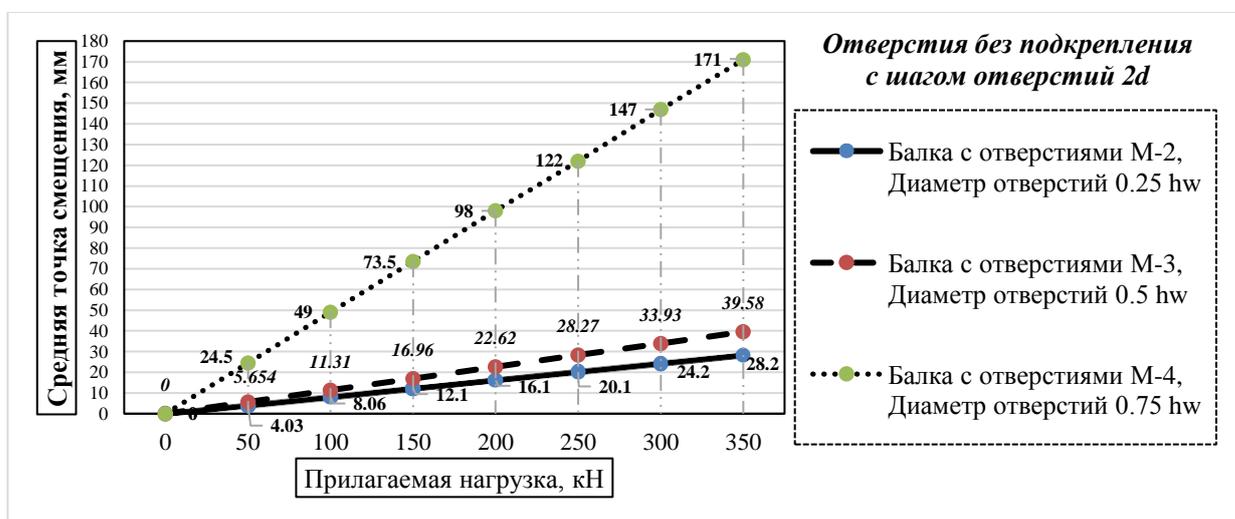


Рисунок 57 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–2, М–3 и М–4

Таблица 25 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий без подкреплений, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отв–тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–2	$0,25h_w$	
М–3	$0,5h_w$	
М–4	$0,75h_w$	

Для определения наиболее эффективного варианта модели гофрированной балки с тремя отверстиями было решено также начать анализ моделей балок с гофрированной стенкой с шагом отверстий $2d$ без подкрепления отверстий. Полученные данные позволяют сделать выводы о том, что наиболее лучший результат показала модель М–2 с диаметром отверстия $0,25h_w$, максимальные перемещения которой не превышают допустимых. Прогиб модели балки М–3 с шагом отверстия $2d$, больше чем у модели балки М–2 на 40,7%, а прогиб модели балки М–4 с шагом отверстия $0,75h_w$, больше чем у модели балки М–2 на 606 %. У всех моделей наблюдается снижение значений сопротивления элементов к потере устойчивости с увеличением размера отверстий. Поэтому для уменьшения прогибов и увеличения устойчивости и прочности балки, ослабленной двумя отверстиями, также необходимо усиление отверстия.

На рисунке 58 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–5, М–6 и М–7 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 26 – форма их прогиба.

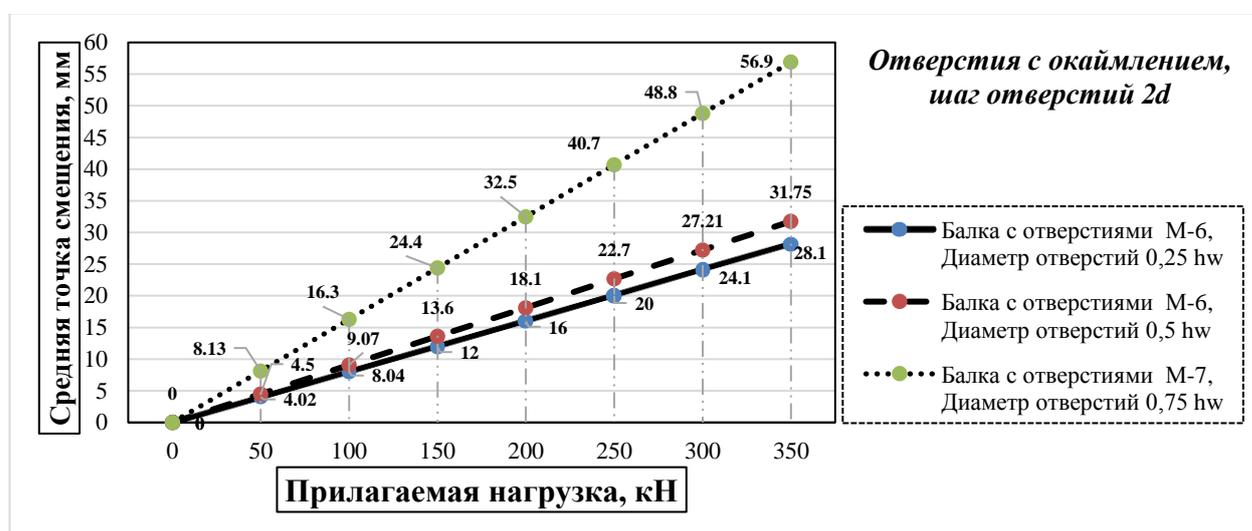


Рисунок 58 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–5, М–6 и М–7

Таблица 26 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отвл-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–5	$0,25h_w$	
М–6	$0,5h_w$	
М–7	$0,75h_w$	

Анализ полученных данных моделей балок М–5, М–6 и М–7 с шагом отверстий $2d$ и окаймлением отверстий из полосовой стали толщиной 3 мм в целом показывает результаты лучше, чем без усиления отверстий. Так, например, на модель балки М–5 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление практически не повлияло. Для модели балки М–6 с диаметром отверстия $0,5h_w$, окаймление уменьшило прогиб на 20%, по сравнению с моделью балки М–3. Для модели балки М–7 с диаметром отверстия $0,75h_w$, усиление отверстия окаймлением показало высокие результаты, прогиб уменьшился по сравнению с моделью балки М–4 на 66,73%.

На рисунке 59 показана зависимость «нагрузка–прогиб» середины моделей балок М–8, М–9 и М–10 с шагом отверстий $2d$ при работе в упругой стадии, а в таблице – 27 форма их прогиба.

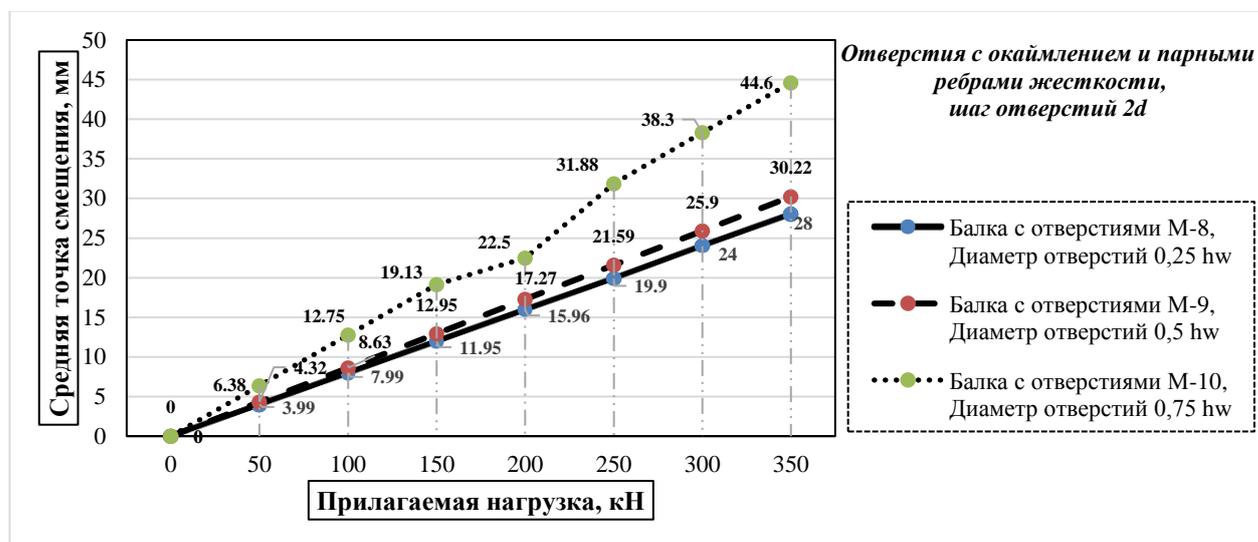


Рисунок 59 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–8, М–9 и М–10

Таблица 27 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением и парными ребрами жесткости, шаг отверстий $2d$

Марка модели	Диаметр отв–тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–8	$0,25h_w$	
М–9	$0,5h_w$	
М–10	$0,75h_w$	

Завершающим этапом по усилению моделей балок с шагом отверстий $2d$ стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребер жесткости была принята 10 мм. На модель балки М–8 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление парными ребрами практически никак не повлияло на прогиб, а вот для моделей балок М–9 и М–10 с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ показало результаты лучше, так, например, у модели балки М–9 прогиб уменьшился на 4,82% по сравнению с моделью М–6 и на 23,85% уменьшился прогиб по сравнению с М–3, а у модели балки М–10 прогиб стал меньше 21,62%, чем у модели М–7 и на 73,92%, чем у модели балки М–4.

На рисунке 60 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–11, М–12 и М–13 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 28 – форма их прогиба.

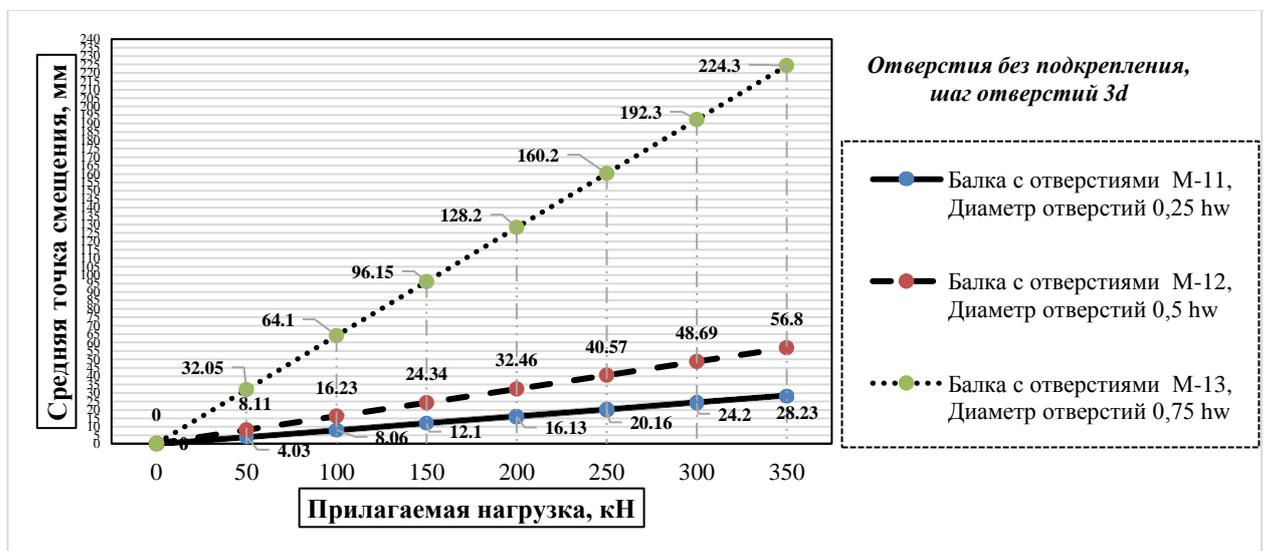


Рисунок 60 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–11, М–12 и М–13

Таблица 28 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий без подкреплений, шаг отверстий $3d$

Марка модели	Диаметр отв-тия	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–11	$0,25h_w$	
М–12	$0,5h_w$	
М–13	$0,75h_w$	

Анализируя полученные данные моделей балок М–11, М–12 и М–13 можно сделать вывод, что, в целом, прогибы и деформации моделей балок с шагом

отверстий $3d$ без подкрепления отверстий больше, чем у аналогичных моделей балок М–2, М–3, М–4 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий, равным $2d$. Деформации и перемещения моделей балок М–11 и М–2 с шагом отверстий $3d$ и $2d$ и диаметром отверстий $0,25h_w$, идентичны. Прогиб модели балки М–12 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ больше 43,1%, чем для аналогичной модели балки М–3 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$. Результаты прогиба, полученные для модели балки М–13 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ больше 31%, чем для аналогичной модели балки М–4 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$.

На рисунке 61 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–14, М–15 и М–16 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 29 – форма их прогиба.

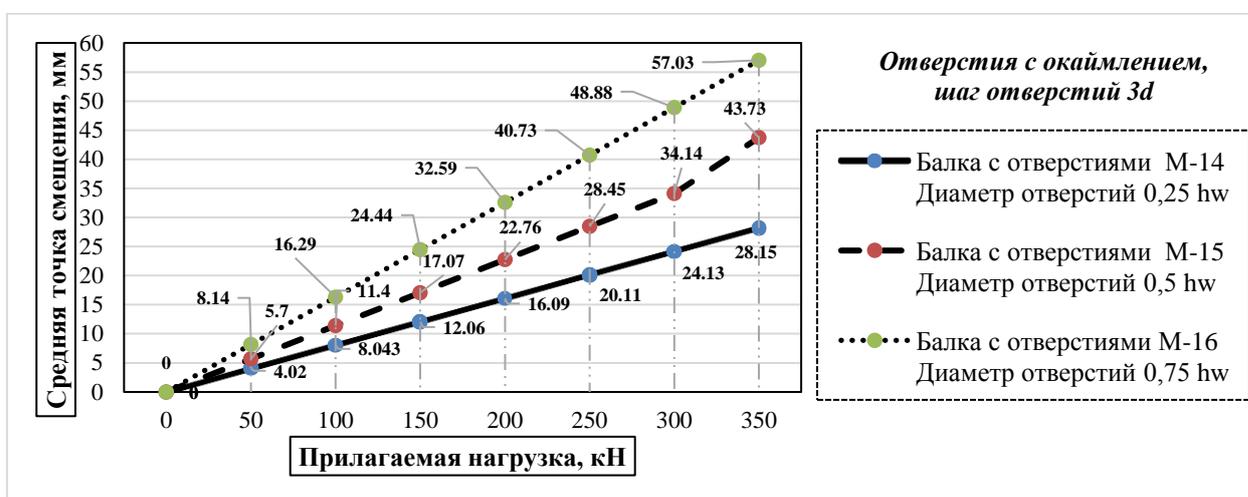


Рисунок 61 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–14, М–15 и М–16

Таблица 29 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $3d$

Марка модели	Диаметр отверстий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–14	$0,25h_w$	
М–15	$0,5h_w$	
М–16	$0,75h_w$	

После того как в работу моделей балок М–14, М–15 и М–16 с шагом отверстий $3d$ с было включено усиление отверстий окаймлением, были получены следующие результаты: как и в предыдущих случаях, поведение модели М–14 с диаметром отверстия $0,25h_w$ и шагом отверстий $3d$ мало изменилось после усиления, а также практически не показало изменения по сравнению с полученными данными для модели М–5 с тем же диаметром, но шагом отверстий равным $2d$. А вот для остальных двух моделей М–15 и М–16 усиление окаймлением сказалось положительно и уменьшило их прогиб по сравнению с моделями балок М–12 и М–13, на 23,01% и 75,6 % соответственно. Однако полученный результат данных двух моделей балок М–6 и М–7 уступает по своим показателям аналогичным моделям балок М–9 и М–10 с шагом $2d$ на 37,73 % и 0,3%, соответственно.

На рисунке 62 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–17, М–18 и М–19 с шагом отверстий $3d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 30 – форма их прогиба.

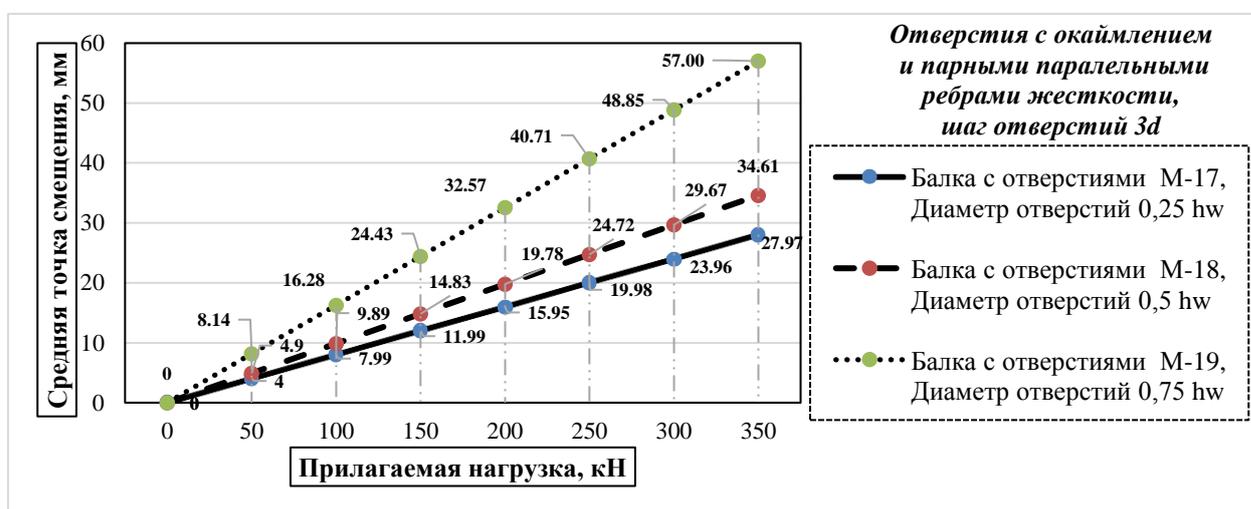


Рисунок 62 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–17, М–18 и М–19

Таблица 30 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением и парными ребрами жесткости, шаг $3d$

Марка модели	Диаметр отвл-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–17	$0,25h_w$	
М–18	$0,5h_w$	
М–19	$0,75h_w$	

Завершающим этапом по усилению моделей с двумя отверстиями балок с шагом отверстий $3d$ стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребер жесткости была принята 10 мм. На модель балки М–17 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление парными параллельными ребрами практически ни как не повлияло на прогиб, а вот для моделей балок М–18 и М–19 с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ показало лучше результаты, так например, у модели балки М–18 прогиб меньше на 20,86%, чем у модели М–15 и на 39,07 % меньше, чем прогиб модели М–12, а прогиб модели балки М–19 меньше на 0,06%, чем у модели М–1 и на 74,59% меньше прогиба модели балки М–13. Полученный результат данных двух моделей балок М–18 и М–19 уступает по своим показателям аналогичным моделям балок М–9 и М–10 с шагом $2d$ на 14,52 % и 27,8 %, соответственно.

На рисунке 63 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–20, М–21 и М–22 с шагом отверстий $4d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 31 – форма их прогиба.

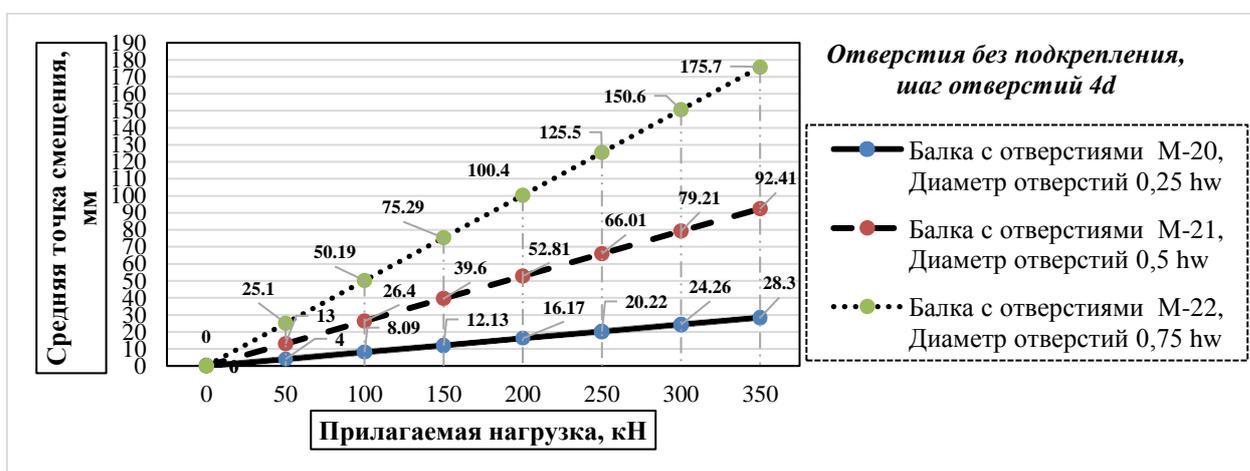


Рисунок 63 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–20, М–21 и М–22

Таблица 31 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий без подкреплений, шаг отверстий $4d$

Марка модели	Диаметр отв–тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М–20	$0,25h_w$	
М–21	$0,5h_w$	
М–22	$0,75h_w$	

Анализируя полученные данные моделей балок М–20, М–21 и М–22 можно сделать вывод, что в целом прогибы и деформации моделей балок с шагом отверстий $4d$ без подкрепления отверстий больше, чем у аналогичных моделей балок М–11, М–12, М–13 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий равным $3d$ и у аналогичных моделей балок М–2, М–3, М–4 с одинаковым диаметром отверстий, но отличным шагом отверстий равным $2d$. Деформации и перемещения моделей балок М–20, М–11 и М–2 с шагом отверстий $4d$, $3d$ и $2d$ и диаметром отверстий $0,25h_w$, идентичны. Прогиб модели балки М–21 с шагом отверстий $4d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ больше на 62,62%, чем для аналогичной модели балки М–12 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$ и на 132,88% больше, чем для аналогичной модели балки М–3 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,5h_w$. Результаты прогиба, полученные для модели балки М–22 с шагом отверстий $4d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ меньше на 21,67%, чем для аналогичной модели балки М–13 с шагом отверстий $3d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$ и на 2,74% больше, чем для аналогичной модели балки М–4 с шагом отверстий $2d$ и диаметром отверстий $0,75h_w$.

На рисунке 64 показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок М–23, М–24 и М–25 с шагом отверстий $4d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 32 – форма их прогиба.

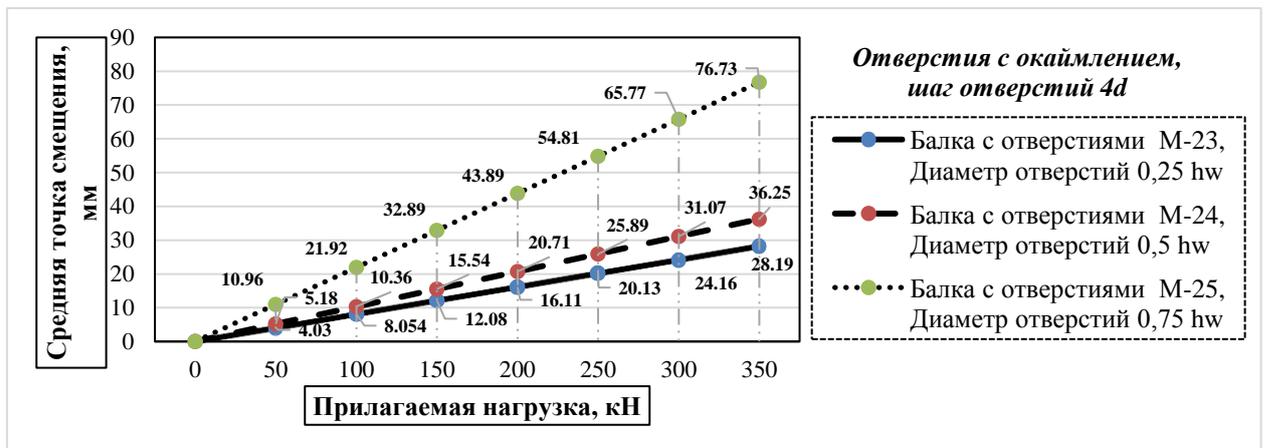
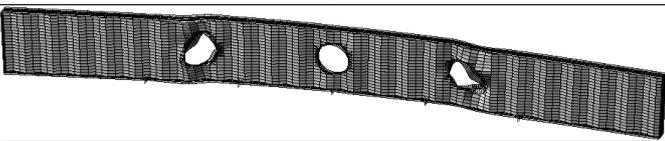
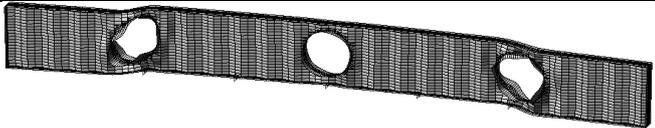


Рисунок 65 – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок М–23, М–24 и М–25

Таблица 32 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением, шаг отверстий $4d$

Марка модели	Диаметр отв-тий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
1	2	3
М–23	$0,25h_w$	

Продолжение таблицы 32

1	2	3
M-24	$0,5h_w$	
M-25	$0,75h_w$	

После того как в работу моделей балок M-23, M-24 и M-25 с шагом отверстий $4d$ с было включено усиление отверстий окаймлением, были получены следующие результаты: как и в предыдущих случаях, поведение модели M-23 с диаметром отверстия $0,25h_w$ и шагом отверстий $4d$ мало изменилось после усиления, а также практически не показало изменения по сравнению с полученными данными для модели M-5 и M-14 того же диаметра, но шагом отверстий равным $2d$ и $3d$, соответственно. А вот для остальных двух моделей M-24 и M-25 усиление окаймлением сказалось положительно и уменьшило их прогиб по сравнению с моделями балок M-21 и M-22 на 60,77% и 56,33% соответственно. Однако полученный результат модели балки M-24 показал результаты хуже по сравнению с моделью балки M-6-2 и с шагом $2d$ на 14,17%, а прогиб модели балки M-25 оказался больше на 34,85%, чем у модели M-7. А при сравнении результата моделей балок M-24 и M-25 с результатами аналогичных моделей балок M-15 и M-16 с шагом $3d$, получим, что показатели прогиба модели балки M-24 лучше на 17,11% показателей модели балки M-15, но для модели балки M-25 результаты прогиба на 34,54% хуже результатов прогиба модели балки M-16.

На рисунке бб показана зависимость «нагрузка – прогиб» середины моделей балок M-26, M-27 и M-28 с шагом отверстий $4d$ при работе в упругой стадии, а в таблице 33 – форма их прогиба.

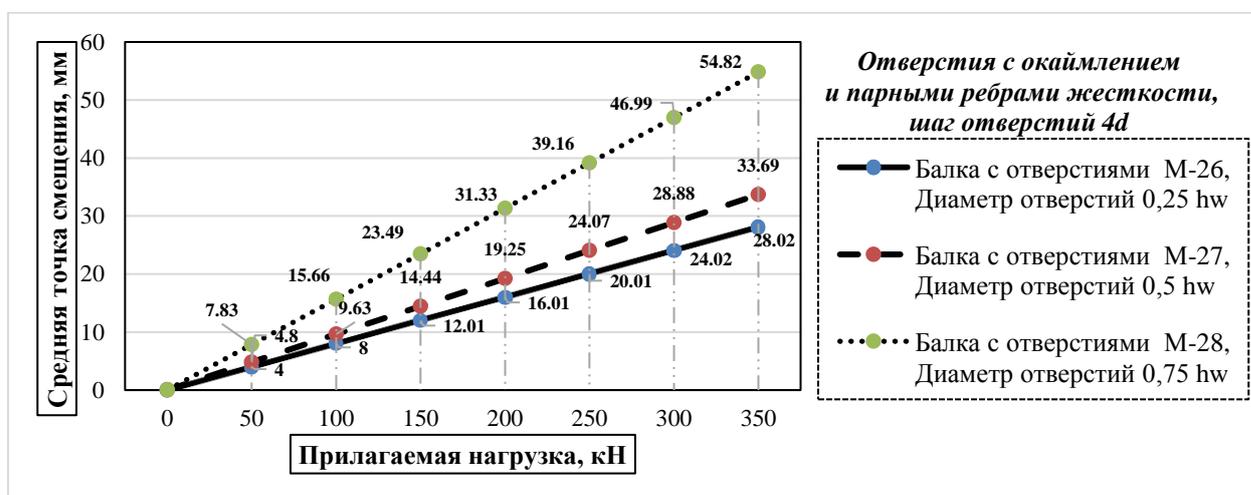
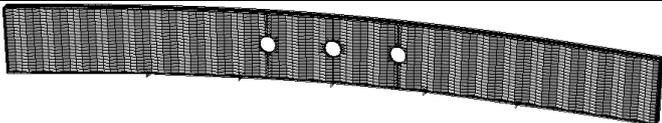
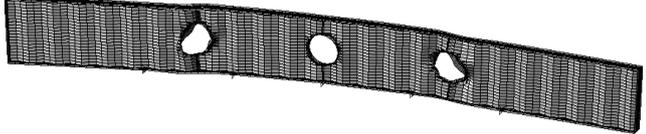
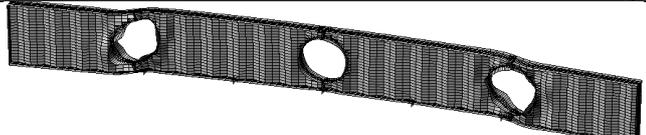


Рисунок бб – График зависимости перемещения от прилагаемой нагрузки в моделях балок M-26, M-27 и M-28

Таблица 33 – Форма прогиба моделей балок с разным диаметром трех отверстий, усиленных окаймлением и парными параллельными ребрами жесткости, шаг отверстий $4d$

Марка модели	Диаметр отверстий	Форма деформации моделей балок с отверстиями
М-26	$0,25h_w$	
М-27	$0,5h_w$	
М-28	$0,75h_w$	

Завершающим этапом по усилению моделей балок с двумя отверстиями и шагом отверстий $4d$, так же, как и для отверстий с шагом $2d$, $3d$ стало включение в работу стенки с отверстиями, усиленных окаймлением, парных параллельных ребер жесткости. Толщина ребер жесткости была принята 10 мм. И снова на модель балки М-26 с диаметром отверстия $0,25h_w$, усиление парными ребрами практически не повлияло на прогиб. Для моделей балок М-27 и М-28 с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ усиление дало результаты лучше, так, например, прогиб модель балки М-27 меньше на 7,06% чем прогиб модели балки М-24 и на 63,55% прогиб меньше модели балки М-21, а прогиб модели балки М-28 меньше на 28,56% чем прогиб модели балки М-25 и на 68,8% меньше прогиба модели балки М-22. Полученный результат данных двух моделей балок М-27 и М-28 при сравнении с показателями аналогичных моделей балок М-18 и М-19 с шагом $3d$ прогиб на 2,66% и 3,83%, соответственно, меньше, а при сравнении с показателями модели балки М-9 с шагом $2d$ прогиб на 11,48% больше, а при сравнении с показателями модели балок и М-10 с шагом $2d$ прогиб на 22,91% больше.

По проведенному анализу моделей балок с тремя отверстиями различного диаметра и шага, можно сделать следующие основные выводы:

– наиболее эффективной моделью балки с тремя отверстиями диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ стала модель балки М-8, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=478,2$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М-17, при нагрузке $Q_{max}=478$ кН; с шагом $4d$ – модель М-26, при нагрузке $Q_{max}=477,2$ кН. Все модели балок, отверстия которых укреплялись окаймлением листовой сталью и парными ребрами жёсткости, расположенные по обе стороны отверстия, показали наилучшие результаты. При проектировании, из перечисленных трех моделей балок, можно рекомендовать модель балки М-8, имеющую наилучшие показатели с диаметром отверстия $0,25h_w$ и шагом $2d$. Не смотря на то, что влияние усиле-

ния отверстий на прогиб моделей балок с диаметром отверстий $0,25h_w$ минимально, рекомендуется также выполнять их с окаймлением;

– наиболее эффективной моделью балки с диаметром отверстия $0,5h_w$ с шагом $2d$ стала модель балки М–9, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=442,4$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М–18, при нагрузке $Q_{max}=386,3$ кН; с шагом $4d$ – модель М–27, при нагрузке $Q_{max}=396,8$ кН. Все указанные модели, отверстия которых укреплялись окаймлением листовой сталью и вертикальными парными ребрами жёсткости, расположенные по обе стороны отверстия, показали наилучшие результаты. При проектировании, из перечисленных трех моделей балок, можно рекомендовать модель балки М–9, имеющую наилучшие показатели с диаметром отверстия $0,5h_w$ и шагом $2d$;

– наиболее эффективной моделью балки с диаметром отверстия $0,75h_w$ с шагом $2d$ стала модель балки М–10, максимальная возможная нагрузка Q_{max} на данную модель балки для достижения ею предельного прогиба равна $Q_{max}=299,6$ кН; с шагом $3d$ – модель балки М–19 при нагрузке $Q_{max}=270$ кН; с шагом $4d$ модель М–28 при нагрузке $Q_{max} = 202$ кН. При проектировании, для перечисленных моделей балок, при данном способе укрепления не рекомендуется применять их без дополнительных мероприятий по повышению несущей способности.

В общем, у всех моделей с тремя отверстиями наблюдается снижение значений сопротивления элементов к потере устойчивости с увеличением размера отверстия и шага отверстий. Поэтому, для уменьшения прогибов и увеличения устойчивости и прочности балки, ослабленной отверстиями, также необходимо усиление отверстий.

Таким образом, наиболее оптимальным диаметром отверстий при проектировании балок с тремя отверстиями может стать диаметр отверстия $0,25h_w$ и $0,5h_w$ с шагом отверстий $2d$. Для повышения несущей способности гофрированной балки, ослабленной отверстиями обязательно необходимо усиление отверстий окаймлением листовой сталью, а также подкрепление отверстий парными вертикальными ребрами жёсткости. В случае острой необходимости отверстия с диаметром $0,75h_w$ рекомендуется применение стали с более высокими прочностными характеристиками, с целью увеличения несущей способности и уменьшения трудоемкости ее изготовления.

4.5.2 Определение влияния расположения отверстия по высоте гофрированной стенки

Для определения влияния расположения отверстия на жесткость гофрированной стенки с гофрами треугольного очертания, было принято решения о смещении центра отверстия на 100 мм в сторону растянутого пояса и на 100 мм в сторону сжатого пояса. Модели балок приняты с тремя отверстиями в стенке. Диаметр отверстий принят $0,5h_w$, так как диаметр отверстий меньше данных существенного влияния на работу гофрированной стенки не оказывает. Шаг отверстий принят $2d$, $3d$ и $4d$. Отверстия подкреплены окаймлением из листовой стали шириной 165 мм и толщиной 3 мм, а также ребрами жесткости толщиной

10 мм. Толщина стенки – 1,9 мм. Полученные данные по прогибам моделей сведены в таблицу 34.

Таблица 34 – Влияние расположения трех усиленных отверстий по высоте гофрированной стенки на прогиб балки

Марка модели балки	Шаг отверстий	Смещение от центра по оси Z (мм)	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
			50	100	150	200	250	300	350
М-9	2d	+100	4,04	8,08	12,12	16,17	20,21	24,24	28,29
М-9	2d	0	4,08	8,16	12,24	16,32	20,40	24,48	28,56
М-9	2d	-100	4,11	8,23	12,35	16,47	20,59	24,71	28,82
М-18	3d	+100	4,12	8,24	12,36	16,48	20,60	24,72	28,85
М-18	3d	0	4,16	8,33	12,49	16,66	20,82	25,00	29,15
М-18	3d	-100	4,22	8,44	12,65	16,87	20,99	25,30	29,52
М-27	4d	+100	4,12	8,24	12,36	16,47	20,59	24,71	28,83
М-27	4d	0	4,15	8,30	12,45	16,60	20,75	24,90	29,05
М-27	4d	-100	4,19	8,34	12,56	16,75	20,94	25,13	29,32

Анализируя данные таблицы 34, можно сделать выводы, что балки с диаметром отверстий $0,5h_w$ при шаге отверстий $2d$, $3d$ и $4d$, во всех случаях трех случаях, смещение отверстия в сторону растянутого или сжатого пояса существенно не повлияло на прогиб. Однако, можно заметить, что небольшое уменьшения прогиба моделей достигается при смещении отверстия в сторону растянутого пояса балки. Это дает основание утверждать, что наиболее оптимальным вариантом для расположения отверстия по высоте стенки балки является центральная часть стенки, но в случаи необходимости смещения отверстия, эффективнее будет смещение в сторону растянутого пояса балки.

4.5.3 Влияние усиления круговых отверстий на увеличение сопротивления к потере устойчивости

До начала исследования усиления круглых отверстий, был исследован зарубежный опыт проектирования, расчета и испытаний балок с круглыми отверстиями [147, 148].

По данным исследования [149] при усилении отверстия $d = 400$ мм и толщиной гофрированной стенки синусоидального очертания $0,333$ мм использовалось окаймление из пластин толщиной 2 мм, 6 мм и 12 мм. Также в одной из моделей в конструкцию окаймления был добавлен загиб внешней грани окаймления из пластины толщиной 2 мм. Были получены следующие результаты: до 20% увеличилась несущая способность в моделях с усилением окаймлением пластинами и еще на 12% после усиления с элементами загиба пластины окаймления.

По выполненным исследованиям работы моделей балок с различным шагом и диаметром отверстий была выявлена эффективность включения в работу

стенки с отверстиями дополнительного окаймления и парных вертикальных ребер жесткости. По полученным данным можно сделать вывод, что величина прогиба модели балки с отверстиями напрямую зависит от толщины элементов усиления данного отверстия. Так, например, при действии постоянной нагрузки для отверстия диаметром $0,25h_w$ при изменении толщины окаймления и парных вертикальных ребер жесткости от 2 мм до 10 мм прогиб модели балки изменился меньше чем на 1%. То есть для данного диаметра влияние изменения толщины окаймления и парных вертикальных ребер жесткости не существенно. Для отверстия диаметром $0,5h_w$ при изменении толщины окаймления и парных ребер жесткости от 2 мм до 10 мм прогиб модели балки изменился на 8,55%. С увеличением диаметра отверстия, увеличение толщины окаймления и парных вертикальных ребер жесткости существенно снижает деформации и прогибы в модели балки с гофрированной стенкой.

В таблице 35 приведен результат полученных данных прогиба моделей балки с гофрированной стенкой для отверстий диаметром $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$ для шага отверстий $2d$ при усилении отверстия окаймлением и параллельными ребрами жесткости без и с загибом внешней грани окаймления с различной шириной окаймления [148].

Таблица 35 – Влияние изменения толщины и ширины окаймления и ребер жесткости, а также наличие и отсутствие загиба окаймления на несущую способность моделей балок с гофрированной стенкой с отверстиями

Марка модели	Диаметр и шаг отверстий	Суммарная нагрузка, (кН)	Ширина окаймления(мм)	Толщина окаймления и ребер жесткости (без загиба внешней грани окаймления), мм	Прогиб без загиба в (мм)	Толщина загиба внешней грани окаймления (мм)	Прогиб с загибом окаймления в (мм)
2	3	4	5	6	7	8	9
М-8	$0,25h_w, 2d$	350	50	2	28,07	2	28,03
				4	28,01	4	27,96
				6	27,97	6	27,91
				8	27,94	8	27,88
				10	27,91	10	27,86
			75	2	28,06	2	28,04
				4	28,00	4	27,96
				6	27,96	6	27,91
				8	27,92	8	27,88
				10	27,89	10	27,86
			100	2	28,06	2	28,04
				4	27,99	4	27,99
				6	27,94	6	27,93
				8	27,92	8	27,89
				10	27,92	10	27,86
М-9	$0,5h_w, 2d$	350	110	2	31,32	2	29,17
				4	29,93	4	28,67
				6	29,28	6	28,43
				8	28,89	8	28,27

Продолжение таблицы 35

2	3	4	5	6	7	8	9
			165	10	28,64	10	28,15
				2	31,28	2	28,80
				4	29,62	4	28,42
				6	29,05	6	28,24
				8	28,73	8	28,11
			220	10	28,51	10	28,02
				2	31,16	2	28,72
				4	29,39	4	28,38
				6	28,89	6	28,21
				8	28,62	8	28,09
M-10	$0,75h_w,$ $2d$	350	180	10	28,43	10	28,00
				2	67,55	2	35,94
				4	44,32	4	32,20
				6	35,85	6	30,89
				8	32,85	8	30,16
			270	10	31,32	10	29,68
				2	69,68	2	33,47
				4	43,62	4	31,0
				6	34,70	6	30,04
				8	32,03	8	29,49
			360	10	30,72	10	29,12
				2	70,83	2	33,29
				4	42,94	4	30,94
				6	33,84	6	30,01
				8	31,44	8	29,47
			10	30,27	10	29,10	

Для определения влияния усиления отверстий на несущую способность балки с гофрированной стенкой, где площадь окаймления отверстия в стенке балки, а соответственно, в нашем случае его ширина, была принята равной площади самого отверстия, а также с ее увеличением в 1,5 и 2 раза. Получены следующие результаты: для в моделей с диаметром отверстий $0,25h_w$ усиление окаймлением и параллельными ребрами жесткости уменьшило прогиб менее чем на 1% и еще на 1% после усиления с элементами загиба пластины окаймления для ширины окаймления 50 мм, 75 мм и 100 мм. Для в моделей с диаметром отверстий $0,5h_w$ усиление окаймлением и параллельными ребрами жесткости уменьшило прогиб балки на 20–25%, а для ширины окаймления 110 мм после усиления с элементами загиба пластины окаймления уменьшило прогиб еще на 3–5%, для ширины окаймления 165 и 220 мм прогиб балки уменьшился еще на 5–8%. Для в моделей с диаметром отверстий $0,75h_w$ усиление окаймлением и параллельными ребрами жесткости прогиб балки уменьшился более чем в 2 раза, а для ширины окаймления 180 мм после усиления с элементами загиба пластины окаймления, где толщина окаймления и ребер жесткости были приняты 2 мм, прогиб уменьшился на 45%. С толщиной окаймления и ребрами жесткости равными от 4 мм до 10 мм в среднем прогиб балки уменьшился на 13,5%. Для ширины окаймления 270 мм усиление элементами загиба пластины окаймления, где толщина окаймления и ребер жесткости были приняты 2 мм, прогиб балки умень-

шился на 52%. С толщиной окаймления и ребрами жесткости равными от 4 мм до 10 мм в среднем прогиб балки уменьшился на 13,8%. Для ширины окаймления 360 мм после усиления элементами загиба пластины окаймления, где толщина окаймления и ребер жесткости были приняты 2 мм, прогиб балки уменьшился на 53%, с толщиной окаймления и ребрами жесткости равными от 4 мм до 10 мм в среднем для всех моделей прогиб балок уменьшился на 11,2%.

В целом по влиянию площади окаймления на уменьшение прогиба получены следующие результаты: увеличение площади окаймления для отверстий с диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ не влияет на прогиб, поэтому эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия; увеличение площади окаймления для отверстий с диаметром $0,5h_w$ и шагом $2d$ влияет на прогиб не существенно, поэтому также эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия; увеличение площади окаймления для отверстий с диаметром $0,75h_w$ и шагом $2d$ уменьшает прогиб менее чем на 4%, в данном случае также эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия.

На рисунке 67 показаны результаты анализа поведения моделей балок с гофрированной стенкой без отверстия с диаметром отверстия $0,5h_w$, без усиления, а также с различными вариантами усиления отверстия. Во всех моделях балок с отверстиями, усиленных окаймлением с различной толщиной и шириной, ребрами жесткости, наблюдается уменьшение прогиба моделей балок по сравнению с моделями без усиления. Также было замечено уменьшение прогиба до в случае использования окаймления с элементами с загиба внешней грани окаймления.

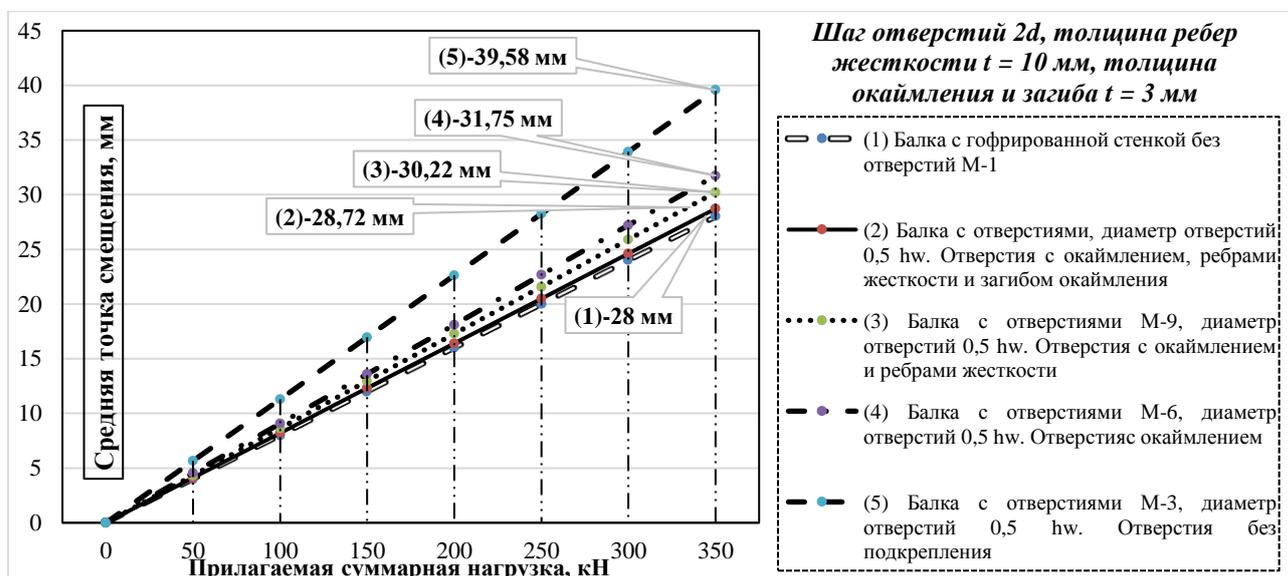
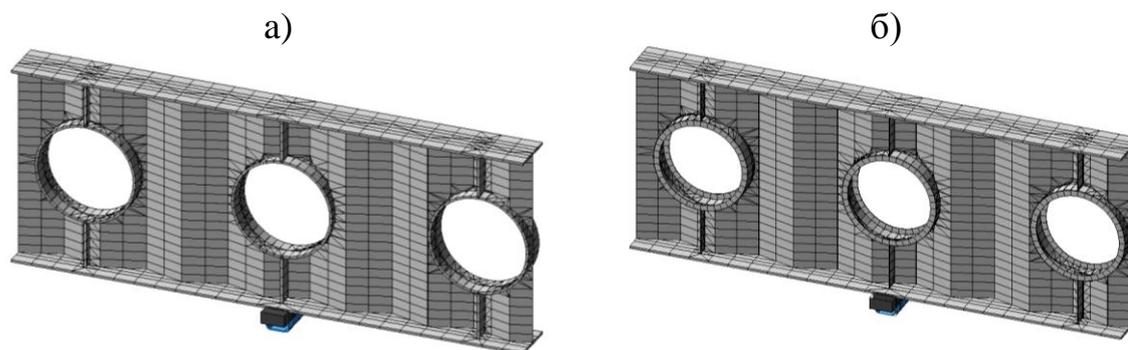


Рисунок 67 – График зависимости перемещения от прикладываемой нагрузки в моделях балок М-1, М-9, М-6, М-3, а также балки (2), усиленной дополнительно загибом окаймления

На рисунке 68 (а) показаны формы усиления балок с гофрированной стенкой, ослабленных круговыми отверстиями с окаймлением и ребрами жесткости без загиба внешней грани окаймления, и окаймлением с ребрами жесткости с за-

гибом внешней грани окаймления (рисунок 68 (б)). Окаймление обеспечивает сопротивляемость на сдвиг стенки внутрь.



а) окаймление и ребра жесткости без загиба внешней грани окаймления; б) окаймление и ребра жесткости с загибом внешней грани окаймления
Рисунок 68 – Форма усиления круглого отверстия с диаметром $0,5h_w$:

4.5.4 Определение влияния усиления зоны отверстия полуторной и двойной стенкой

После определения влияния усиления отверстий окаймление, парными ребрами жесткости и загибом внешней окаймления на уменьшение прогиба балки было принято решение рассмотреть вариант усиления отверстий с диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ в гофрированной стенке двутавровой балки с треугольным очертанием гофров для шага отверстий $2d$, $3d$ и $4d$ путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $1,5t_w$ и $2t_w$. Толщина стенки $t_w=1,9$ мм.

В таблице 36 в числителе указаны прогибы балок с отверстиями без какого-либо усиления, а в знаменателе значение прогибов балок с усилением стенки балки путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $1,5t_w$.

Таблица 36 – Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без усиления отверстий и с усилением отверстий путем утолщения стенке в области отверстия на $1,5t_w$

Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
			50	100	150	200	250	300	350
М-3	$2d$	$0,5h_w$	<u>5,654</u>	<u>11,31</u>	<u>16,96</u>	<u>22,62</u>	<u>28,27</u>	<u>33,93</u>	<u>39,68</u>
			5,351	10,7	16,05	21,4	26,75	32,1	37,45
М-4	$2d$	$0,75h_w$	<u>24,50</u>	<u>49,0</u>	<u>73,5</u>	<u>98,0</u>	<u>122,0</u>	<u>147,0</u>	<u>171,0</u>
			20,92	41,83	62,75	83,67	104,1	125,5	146,4
М-12	$3d$	$0,5h_w$	<u>8,114</u>	<u>16,23</u>	<u>24,34</u>	<u>32,46</u>	<u>40,57</u>	<u>48,69</u>	<u>56,8</u>
			6,392	12,78	19,18	25,57	31,96	38,35	44,75
М-13	$3d$	$0,75h_w$	<u>32,05</u>	<u>64,1</u>	<u>96,15</u>	<u>128,2</u>	<u>160,2</u>	<u>192,3</u>	<u>224,3</u>
			26,4	52,79	79,18	105,6	132,0	158,4	184,4
М-21	$4d$	$0,5h_w$	<u>13,2</u>	<u>26,4</u>	<u>39,6</u>	<u>52,81</u>	<u>66,01</u>	<u>79,21</u>	<u>92,41</u>
			11,19	22,38	33,56	44,75	55,94	67,13	78,31
М-22	$4d$	$0,75h_w$	<u>25,1</u>	<u>50,19</u>	<u>75,29</u>	<u>100,4</u>	<u>125,5</u>	<u>150,6</u>	<u>175,7</u>
			20,81	41,61	62,42	83,23	104,0	124,8	145,6

При сравнении полученных прогибов балок с отверстиями без усиления и с усилением отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $1,5t_w$ получены следующие результаты: так для модели балки М–3 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем 5,4%, для модели М–12 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 21,2%, для модели М–21–2 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 15,2%. Для модели М–4 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 14,6%, для модели М–13 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 17,64%, для модели М–22 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 17,1%.

Таким образом, для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ и шагом $2d$, $3d$ и $4d$ усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $1,5t_w$ уменьшает прогиб балок без усиления отверстий в среднем от 5,4% до 17,1%.

В таблице 37 в числителе приведены прогибы балок с отверстиями без усиления, а в знаменателе значение прогибов для балок с усилением стенки балки путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$.

Таблица 37 – Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров без усиления отверстий и с усилением отверстий путем утолщения стенке в области отверстия на $2t_w$

Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
			50	100	150	200	250	300	350
М–1	–	Без отверстий	4,01	8,01	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
М–3	$2d$	$0,5h_w$	<u>5,654</u>	<u>11,31</u>	<u>16,96</u>	<u>22,62</u>	<u>28,27</u>	<u>33,93</u>	<u>39,68</u>
			5,045	10,09	15,14	20,18	25,23	30,27	35,32
М–4	$2d$	$0,75h_w$	<u>24,5</u>	<u>49,0</u>	<u>73,5</u>	<u>98,0</u>	<u>122,0</u>	<u>147,0</u>	<u>171,0</u>
			17,67	35,33	53,0	70,67	88,33	106,0	123,7
М–12	$3d$	$0,5h_w$	<u>8,114</u>	<u>16,23</u>	<u>24,34</u>	<u>32,46</u>	<u>40,57</u>	<u>48,69</u>	<u>56,8</u>
			5,77	11,54	17,31	23,08	28,85	34,61	40,38
М–13	$3d$	$0,75h_w$	<u>32,05</u>	<u>64,10</u>	<u>96,15</u>	<u>128,2</u>	<u>160,2</u>	<u>192,3</u>	<u>224,3</u>
			21,65	43,31	64,96	86,61	108,3	129,9	151,6
М–21	$4d$	$0,5h_w$	<u>13,20</u>	<u>26,40</u>	<u>39,60</u>	<u>52,81</u>	<u>66,01</u>	<u>79,21</u>	<u>92,41</u>
			9,405	18,81	28,21	37,62	47,02	56,43	65,83
М–22	$4d$	$0,75h_w$	<u>25,10</u>	<u>50,19</u>	<u>75,29</u>	<u>100,4</u>	<u>125,5</u>	<u>150,6</u>	<u>175,7</u>
			16,97	33,94	50,91	67,88	84,85	101,8	118,8

При сравнении полученных прогибов балок с отверстиями без усиления и с усилением отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ получены следующие результаты: так для модели балки М–3 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем 11%, для модели М–12 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 29%, для модели М–21 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 32%. Для модели М–4 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 28%, для модели М–13 с диаметром $0,75h_w$ и

шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 32,4%, для модели М–22 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 32,4%.

Таким образом, для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ и шагом $2d$, $3d$ и $4d$ усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ уменьшает прогиб балок без усиления отверстий в среднем от 11% до 32%.

В таблице 38 в числителе приведены прогибы для балок с отверстиями, усиленными окаймлением, а в знаменателе значения прогибов балок с усилением путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$.

Таблица 38 –Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров с окаймлением отверстий и с усилением путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$

Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
			50	100	150	200	250	300	350
М–1	–	Без отверстий	4,01	8,01	12,00	16,0	20,0	24,0	28,0
М–6	$2d$	$0,5h_w$	<u>4,54</u>	<u>9,07</u>	<u>13,6</u>	<u>18,1</u>	<u>22,7</u>	<u>27,21</u>	<u>31,75</u>
			5,045	10,09	15,14	20,18	25,23	30,27	35,32
М–7	$2d$	$0,75h_w$	<u>8,13</u>	<u>16,3</u>	<u>24,4</u>	<u>32,5</u>	<u>40,7</u>	<u>48,8</u>	<u>56,9</u>
			17,67	35,33	53,00	70,67	88,33	106,0	123,7
М–15	$3d$	$0,5h_w$	<u>5,691</u>	<u>11,38</u>	<u>17,07</u>	<u>22,76</u>	<u>28,45</u>	<u>34,14</u>	<u>43,73</u>
			5,77	11,54	17,31	23,08	28,85	34,61	40,38
М–16	$3d$	$0,75h_w$	<u>8,146</u>	<u>16,29</u>	<u>24,44</u>	<u>32,59</u>	<u>40,73</u>	<u>48,88</u>	<u>57,03</u>
			21,65	43,31	64,96	86,61	108,3	129,9	151,6
М–24	$4d$	$0,5h_w$	<u>5,179</u>	<u>10,36</u>	<u>15,54</u>	<u>20,71</u>	<u>25,89</u>	<u>31,07</u>	<u>36,25</u>
			9,405	18,81	28,21	37,62	47,02	56,43	65,83
М–25	$4d$	$0,75h_w$	<u>10,96</u>	<u>21,92</u>	<u>32,89</u>	<u>43,89</u>	<u>54,81</u>	<u>65,77</u>	<u>76,73</u>
			16,97	33,94	50,91	67,88	84,85	101,8	118,8

Анализируя данные двух различных вариантов усиления отверстий, можно сделать вывод, что для отверстий с диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ и шагом $2d$, $3d$ и $4d$ усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ показало результаты в среднем от 1,3% до 62% хуже, чем усиление отверстия окаймлением.

Следующим шагом стала проверка парного усиления отверстий окаймлением и утолщением стенки в области отверстия на $2t_w$.

В таблице 39 в числителе приведены прогибы балок с отверстиями, усиленным только окаймлением, а в знаменателе прогибы балок с усилением стенки балки окаймлением и утолщением гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$.

Таблица 39 –Результаты компьютерного моделирования балок с треугольным очертанием гофров с отверстиями, усиленными окаймлением и отверстиями, усиленными окаймлением и утолщением стенке в области отверстия на $2t_w$

№	Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
				50	100	150	200	250	300	350
1	М–1	–	Без отверстий	4,01	8,01	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
2	М–6	$2d$	$0,5h_w$	<u>4,54</u> 4,22	<u>9,07</u> 8,43	<u>13,6</u> 12,64	<u>18,1</u> 16,83	<u>22,7</u> 21,11	<u>27,21</u> 25,3	<u>31,75</u> 29,52
3	М–7	$2d$	$0,75 h_w$	<u>8,13</u> 5,94	<u>16,3</u> 11,91	<u>24,4</u> 17,83	<u>32,5</u> 23,75	<u>40,7</u> 29,75	<u>48,8</u> 35,67	<u>56,9</u> 41,62
4	М–15	$3d$	$0,5 h_w$	<u>5,691</u> 4,65	<u>11,38</u> 9,31	<u>17,07</u> 13,96	<u>22,76</u> 18,61	<u>28,45</u> 23,26	<u>34,14</u> 27,92	<u>43,73</u> 32,57
5	М–16	$3d$	$0,75 h_w$	<u>8,146</u> 5,82	<u>16,29</u> 11,63	<u>24,44</u> 17,45	<u>32,59</u> 23,27	<u>40,73</u> 29,09	<u>48,88</u> 34,9	<u>57,03</u> 40,72
6	М–24	$4d$	$0,5 h_w$	<u>5,179</u> 4,46	<u>10,36</u> 8,93	<u>15,54</u> 13,40	<u>20,71</u> 17,86	<u>25,89</u> 22,32	<u>31,07</u> 26,79	<u>36,25</u> 31,25
7	М–25	$4d$	$0,75 h_w$	<u>10,96</u> 6,74	<u>21,92</u> 13,48	<u>32,89</u> 20,22	<u>43,89</u> 26,96	<u>54,81</u> 33,71	<u>65,77</u> 45,13	<u>76,73</u> 45,98

При сравнении полученных данных по прогибу балок с отверстиями, усиленными окаймлением и отверстиями, усиленными утолщением стенки в области отверстия на $2t_w$ совместно с окаймлением получены следующие результаты: так для модели балки М–6 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 7%, для модели М–15 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 25,5%, для модели М–24 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 13,8%. Для модели М–7 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 26,8%, для модели М–16 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 28,64%, для модели М–25 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 38,5%.

Таким образом, для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ с шагом $2d$, $3d$ и $4d$ совместное усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ и окаймлением уменьшает прогиб балок с отверстиями, усиленными только окаймлением в среднем от 7% до 38,5%.

Для проверки эффективности усиления отверстия путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$ совместно с окаймлением было выполнено сравнение с прогибами балок, отверстия которых усиленных окаймлением и ребрами жесткости.

В таблице 40 в числителе указаны прогибы балок с отверстиями, усиленными окаймлением и парными ребрами жесткости, а в знаменателе значения прогибов балок с отверстиями, усиленными окаймлением и утолщением гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$.

Таблица 40 – Сравнение прогибов балок с отверстиями, усиленными окаймлением и парными ребрами жесткости и прогибов балок с отверстиями, усиленными окаймлением и утолщением гофрированной стенки в области отверстия на $2t_w$

Марка модели балки	Шаг отверстий	Диаметр отверстий	Прогиб в (мм) при нагрузке в (кН)						
			50	100	150	200	250	300	350
М–1		Без отверстий	4,01	8,01	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
М–9	$2d$	$0,5h_w$	<u>4,32</u>	<u>8,635</u>	<u>12,95</u>	<u>17,27</u>	<u>21,59</u>	<u>25,9</u>	<u>30,22</u>
			4,22	8,43	12,64	16,83	21,11	25,3	29,52
М–10	$2d$	$0,75h_w$	<u>6,38</u>	<u>12,75</u>	<u>19,13</u>	<u>22,5</u>	<u>31,88</u>	<u>38,3</u>	<u>44,6</u>
			5,94	11,91	17,83	23,75	29,75	35,67	41,62
М–18	$3d$	$0,5h_w$	<u>4,945</u>	<u>9,88</u>	<u>14,83</u>	<u>19,78</u>	<u>24,72</u>	<u>29,67</u>	<u>34,61</u>
			4,65	9,31	13,96	18,61	23,26	27,92	32,57
М–19	$3d$	$0,75h_w$	<u>8,14</u>	<u>16,28</u>	<u>24,43</u>	<u>32,57</u>	<u>40,71</u>	<u>48,85</u>	<u>57,00</u>
			5,82	11,63	17,45	23,27	29,09	34,9	40,72
М–27	$4d$	$0,5h_w$	<u>4,81</u>	<u>9,62</u>	<u>14,44</u>	<u>19,25</u>	<u>24,07</u>	<u>28,88</u>	<u>33,69</u>
			4,46	8,93	13,40	17,86	22,32	26,79	31,25
М–28	$4d$	$0,75h_w$	<u>7,83</u>	<u>15,66</u>	<u>23,49</u>	<u>31,33</u>	<u>39,16</u>	<u>46,99</u>	<u>54,82</u>
			6,74	13,48	20,22	26,96	33,71	45,13	45,98

При сравнении полученных прогибов балок с отверстиями, усиленными окаймлением и парными ребрами жесткости и отверстиями, усиленными путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ совместно с окаймлением получены следующие результаты: так для модели балки М–9 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 2,3%, для модели М–10 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $2d$ прогиб уменьшился в среднем на 6%, для модели М–18 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 5,9%. Для модели М–19 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $3d$ прогиб уменьшился в среднем на 28,5%, для модели М–27 с диаметром $0,5h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 7,24%, для модели М–28 с диаметром $0,75h_w$ и шагом отверстий $4d$ прогиб уменьшился в среднем на 12,8%.

Таким образом, для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ с шагом $2d$, $3d$ и $4d$ совместное усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ и окаймлением уменьшает прогиб балок по сравнению с усилением окаймлением и парными ребрами жесткости в среднем от 2,3% до 28,5%.

В целом полученные данные доказывают эффективность использования совместного усиления отверстий окаймлением и утолщением стенки в области отверстий над усилением отверстия окаймлением совместно с ребрами жесткости.

Выводы по 4 разделу

1. Результаты проведенного дисперсионного анализа показали, что изменение типа гофрированных балок (Sin и ГС) оказывает статистически значимое

влияние только на изменение величин приведенных моментов сопротивления ($W_y^{\text{пр}}$), при этом не оказывая статистически значимого влияния на изменения приведенных моментов инерции ($I_y^{\text{пр}}$): Тогда как изменение толщины гофрированной стенки (t_w) не оказывает влияние на изменение всех рассматриваемых параметров: приведенных моментов сопротивления ($W_y^{\text{пр}}$), приведенных моментов инерции ($I_y^{\text{пр}}$) для обоих типов балок.

Также отсутствует влияние взаимодействия двух факторов, как для приведенных моментов инерции ($I_y^{\text{пр}}$), так и для приведенных моментов сопротивления ($W_y^{\text{пр}}$).

По выводам, сделанным выше, можно утверждать, что с переходом Республики Казахстан на европейские нормы проектирования Eurocode, а также с внедрением гармонизированной версии в нормы проектирования проектирование, методика, предложенная для расчета балок с гофрированной стенкой синусоидального очертания гофров (Sin балка), в некоторых случаях, может быть применена к балкам с гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров (ГС балка), также и наоборот.

2. Выполнен анализ экспериментальных исследований крупномасштабных моделей двух опорной балки с гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров, без отверстий и ослабленной тремя технологическими отверстиями, изучено напряженное состояние элементов балки и ее деформативность. Полученные данные дали возможность провести сопоставительный анализ деформативности балок одинакового поперечного сечения с отверстиями в стенке и без них при одинаковых условиях работы, а также проверить данные компьютерного моделирования данных испытаний в программном комплексе ЛИРА–САПР 2017, с целью дальнейшего использования данной программы как основной при проведении дальнейших численных исследований сварной двутавровой балки, ослабленной технологическими круглыми отверстиями с разным шагом и диаметром отверстий. Было выявлено, что деформативность испытываемой балки Б–2 с отверстиями без подкрепления в линейной области работы на 20–30% больше аналогичной балки Б–1 без отверстий. Предельное состояние балки наступило при прогибах равных $1/225l$. Были сделаны выводы, о необходимости укрепления стенки на участках между поясами и элементом подкрепления отверстия парными ребрами жесткости, в целях исключения потери местной устойчивости под сосредоточенной нагрузкой в зоне отверстия.

3. Выполнено численное параметрическое исследование балки с треугольным очертанием гофров, включающее в себя анализ 55 моделей конечных элементов. Из них 1 модель балки без отверстий, 27 моделей имели в конструкции стенки три отверстия и 27 – два отверстия с диаметром $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$, расположенные с шагом между центрами отверстий $2d$, $3d$ и $4d$. Параметрическое исследование в программном комплексе для анализа конечных элементов проводилось для моделей балок, с учётом различных размеров отверстий в стенке балки, расстояний между отверстиями, с усилением и без усиления отверстий, а также балки без отверстий.

Анализ работы моделей балок с тремя отверстиями под сосредоточенной нагрузкой показал, что:

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,25h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, понижается в среднем на $0,12\%$, т.е. увеличение шага не влияет на работу балки в целом;

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,5h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, понижается в среднем на 13% , т.е. увеличение шага между отверстиями влияет на работу балки;

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,75h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, понижается в среднем на 63% , т.е. увеличение шага между отверстиями существенно влияет на работу балки.

Анализ работы моделей балок с двумя отверстиями под сосредоточенной нагрузкой показал, что:

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,25h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, понижается в среднем на $0,18\%$, т.е. увеличение шага не влияет на работу балки в целом;

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,5h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, повышается в среднем на $2,56\%$, т.е. увеличение шага между отверстиями влияет на работу балки не существенно;

– с увеличением шага отверстий от $2d$ до $3d$ для диаметра отверстий $0,75h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, повышается на $3,8\%$, т.е. увеличение шага между отверстиями существенно не влияет на работу балки, а с увеличением шага отверстий от $2d$ до $4d$ для диаметра отверстий $0,75h_w$ несущая способность балок, с отверстиями усиленными окаймлением и ребрами жесткости, понижается на $24,92\%$, т.е. увеличение шага между отверстиями существенно влияет на работу балки

В общем, полученные данные для трех отверстий показали эффективность размещения в гофрированной стенке отверстий с шагом отверстий $2d$ и с диаметром отверстий $0,25h_w$ и $0,5h_w$, усиленные окаймлением и параллельными ребрами жесткости.

В общем, полученные данные для двух отверстий показали эффективность размещения в гофрированной стенке отверстий с шагом отверстий $2d$ и $3d$ и с диаметром отверстий $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$, усиленных окаймлением и параллельными ребрами жесткости, а для шага отверстий $4d$ только с диаметром отверстий $0,25h_w$ и $0,5h_w$.

4. Было определено влияние толщины окаймления и парных вертикальных ребер жесткости при различной ширине окаймления на работу моделей балок с гофрированной стенкой с отверстиями, а также было определено влияние загиба внешней грани окаймления на несущую способность моделей балок с гофрированной стенкой с отверстиями. Во всех моделях балок с отверстиями, уси-

ленных окаймлением различной толщины и ширины, ребрами жесткости, было выявлено уменьшение прогиба моделей балок по сравнению с моделями без усиления отверстий. Сравнивая результаты влияния изменения толщины окаймления и ребер жесткости можно сделать следующие выводы: для отверстия с диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ изменение толщины от 2 до 10 мм уменьшило прогиб на 1% вне зависимости от площади окаймления; для отверстия с диаметром $0,5h_w$ и шагом $2d$ изменение толщины от 2 до 10 мм уменьшило прогиб в среднем на 9% вне зависимости от площади окаймления; для отверстия с диаметром $0,75h_w$ и шагом $2d$ изменение толщины от 2 до 10 мм уменьшило прогиб в среднем на 56% вне зависимости от площади окаймления.

Наиболее эффективной толщиной окаймления и ребер жесткости для отверстия с диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 2 до 4 мм; для отверстия с диаметром $0,5h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 4 до 6 мм; для отверстия с диаметром $0,75h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 6 до 8 мм.

5. В целом по влиянию площади окаймления на уменьшение прогиба получены следующие результаты: увеличение площади окаймления для отверстия с диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ не влияет на прогиб, поэтому эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия; увеличение площади окаймления для отверстия с диаметром $0,5h_w$ и шагом $2d$ влияет на прогиб несущественно, поэтому также эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия; увеличение площади окаймления для отверстия с диаметром $0,75h_w$ и шагом $2d$ уменьшает прогиб менее чем на 4%, в данном случае также эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия.

6. Исследовано влияние расположения отверстия по высоте гофрированной стенки на прогиб балки с усиленными отверстиями. Таким образом, можно сделать выводы, что с диаметром отверстия $0,5h_w$ при шаге отверстий $2d$, $3d$ и $4d$, во всех трех случаях, смещение отверстия в сторону растянутого или сжатого пояса существенно не повлияло на прогиб. Однако можно заметить, что небольшое уменьшение прогиба моделей достигается при смещении отверстия в сторону растянутого пояса балки. Поэтому, в случае необходимости смещения отверстия, эффективнее будет смещение в сторону растянутого пояса балки с гофрированной стенкой.

7. После определения влияния усиления отверстия окаймлением, парными ребрами жесткости и загибом внешней грани окаймления на уменьшение прогиба балки было принято решение рассмотреть вариант усиления отверстий с диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ в гофрированной стенке двутавровой балки с треугольным очертанием гофров для шага отверстий $2d$, $3d$ и $4d$ путем утолщения гофрированной стенки в области отверстия на $1,5t_w$ и $2t_w$.

Так для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ и шагом $2d$, $3d$ и $4d$ усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $1,5t_w$ уменьшает прогиб балок по сравнению с балками без усиления отверстий в среднем от 5,4% до 17,1%.

Для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ с шагом $2d$, $3d$ и $4d$ совместное усиление отверстий окаймлением и утолщением стенки в области отверстия на $2t_w$ уменьшает прогиб балок, отверстия которых усилены только окаймлением в среднем от 7% до 38,5%.

8. Следующим шагом стала проверка парного усиления отверстия окаймлением и утолщением стенки в области отверстий на $2t_w$ и усиление окаймлением и парными вертикальными ребрами жесткости.

Таким образом, для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ с шагом $2d$, $3d$ и $4d$ совместное усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ и окаймлением уменьшает прогиб балок по сравнению с отверстиями, усиленными окаймлением и парными вертикальными ребрами жесткости в среднем от 2,3% до 28,5%.

9. Для подсчета эффективности подобранных способов усиления был выполнен расчет по расходу стали на усиление различными вариантами усиления отверстий, таким образом, для отверстия диаметром $0,5 h_w$ масса металла полученного при использовании варианта усиления отверстия окаймлением с утолщением стенки $2t_w$ на 7,5% больше массы металла при усилении отверстия окаймлением с ребрами жесткости; для отверстия диаметром $0,75 h_w$ масса металла полученного при использовании варианта усиления отверстия окаймлением с утолщением стенки $2t_w$ на 15% больше массы металла при усилении отверстия окаймлением с ребрами жесткости. При этом для балок с отверстиями диаметром $0,5h_w$ и $0,75h_w$ совместное усиление отверстий путем утолщения стенки в области отверстия на $2t_w$ и окаймлением уменьшает прогиб балок по сравнению с усилением окаймлением и парными ребрами жесткости от 2,3% до 7,24% для балок с диаметром $0,5 h_w$ и от 6 до 28,5% с диаметром $0,75 h_w$.

Полученные данные помогли определить эффективность использования совместного усиления отверстий окаймлением и утолщением стенки в области отверстий над усилением отверстия окаймлением совместно с ребрами жесткости.

10. Дополнительное уменьшение прогиба было достигнуто в случае использования окаймления с элементами с загиба внешней.

11. Для подтверждения или опровержения эффективности выше принятых усовершенствованных конструктивных решений сварных двутавровых балок с гофрированными стенками, ослабленными отверстиями необходимо проведение натуральных испытаний, а также численного экспериментального исследования.

5 ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИНЯТЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

5.1 Планирование проведения эксперимента

Цель и программа исследования

Основной целью данной главы является проверка и анализ теоретических данных, выводов и результатов, полученных при проведении компьютерного моделирования в главах 3, 4 и 5, методом натуральных испытаний, усовершенствованных металлических гофрированных балок, ослабленных технологическими отверстиями.

Поскольку в настоящее время в имеющихся нормативных источниках РК предложен только один способ усиления отверстий в гофрированной стенке, то разработка новых и усовершенствование существующего метода усиления отверстий представляет собой актуальную задачу. В предыдущих главах были предложены и исследованы различные варианты усиления. Однако их применение в практике строительства сварных балок с гофрированной стенкой, ослабленных отверстиями требует проведение соответствующих лабораторных испытаний на крупномасштабных моделях.

Численное исследование экспериментальных сварных двутавровых балок, ослабленных технологическими отверстиями приведено в Приложении И

Лабораторные испытания проводились с целью оценки влияния параметров отверстия, а также различной формы подкрепления на прочность и устойчивость балок.

В программу исследований входило:

1. Изучение особенностей предельных состояний, а также поведения моделей под нагрузкой и их деформативности.
2. Оценка влияния конструктивных особенностей различных видов усиленных отверстий на критические напряжения устойчивости гофрированных стенок.
3. Изучение деформативности балки с тонкой гофрированной стенкой с отверстиями и без отверстий при линейном и нелинейном характерах работы.
4. Выявление максимальной несущей способности и характера предельного состояния балки.

5.2 Опытные образцы и методика проведения исследований

В лаборатории ТОО «КазГАСА» на силовом полу были проведены испытания моделей балок, изготовленных в цеху ТОО «Юсем Тау» из стали ЗСП ГОСТ 380–2005. В лаборатории были проведены химический анализ и механические испытания образцов взятых из натуральных образцов (Приложение К, Приложение Л).

Испытания [150] проводились по однопролетной схеме на поперечный изгиб сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета (рисунок 69) при шарнирном опирании балок на опоры.

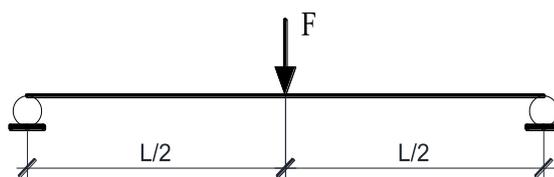


Рисунок 69 – Схема нагружения испытываемых моделей

При проведении эксперимента балки устанавливались на специально изготовленный стенд [151] для проведения испытаний (рисунок 70).

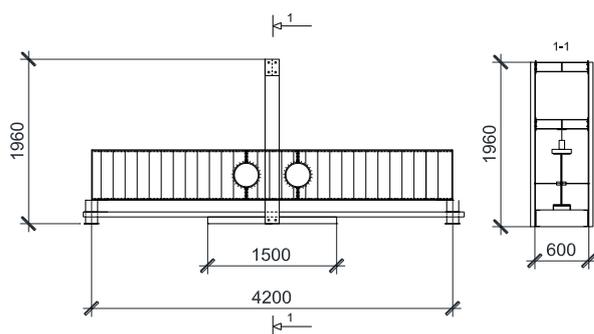


Рисунок 70 – Стенд для натурных испытаний

Загружение балки осуществлялось гидравлическим домкратом ДГО–25 вручную одним гидравлическим насосом через стальную пластину 100×20 мм длиной равной ширине пояса балки ($l = 150$ мм) и передающую давление на пояс по всей его ширине.

Величина нагрузки при испытаниях балок замерялась по электронному динамометру и дублировалась манометром. До начала испытаний используемое оборудование прошло поверку [Приложение М, Н, О].

В процессе испытаний фиксировались величины прогиба с помощью электронных прогибомеров (цена деления 0,01 мм), учитывалось и исключалось влияние перемещений модели в установке за счет податливости вследствие обмятия.

Прогибомеры измеряли вертикальное перемещение и располагались в сечениях, где прикладывалась нагрузка, а также на опорах. Расчетная нагрузка F_p для рассматриваемых образцов балок принята 60 кН. Загружение производилось ступенями, величина которых составляла 10 кН на первых двух ступенях и по 5 кН на последующих. После каждой ступени давалась выдержка по времени и снимались показания прогибомеров.

Учитывая, что гофрированные балки наиболее эффективны и экономически целесообразны при гибкости стенок более 250, толщина и высота стенок моделей приняты соответственно $h_w = 600$ мм и $t_w = 2$ мм ($\lambda_w = 300$). Сечения поясов, равные $b_f \times t_f = 150 \times 6$ мм.

Исходя из программы исследования и в соответствии с теорией оптимального планирования экспериментов [152] было изготовлено 5 моделей, в том числе 4 модели с двумя круглыми отверстиями диаметром $0,5h_w$ и шагом между центрами отверстий $2d$. В ходе эксперимента [153] на моделях с круглыми окаймленными отверстиями, которые применяются в практике проектирования для пропуска технологического оборудования в пределах высоты балок, исследовалось влияние различных способов подкрепления отверстий на несущую способность и деформативность моделей.

В таблице 41 обозначены геометрические характеристики всех испытанных образцов сварных гофрированных балок.

Таблица 41 – Геометрические характеристики моделей балок

Модель балки	Размеры профиля, см					Параметры гофров, L_r см	Параметры гофров, f_r см	Расстояние до ближайшей силы, «F», см	Длина модели l , см	Вариант усиления отверстий
	h	b	s	t	h_w					
БГС-1	61,2	15	0,20	0,6	60	28	4,5	210	420	Без отверстий
БГС-2	61,2	15	0,20	0,6	60	28	4,5	210	420	Отверстия без подкрепления
БГС-3	61,2	15	0,20	0,6	60	28	4,5	210	420	Отверстия с окаймлением и утолщением стенки на $2 t_w$
БГС-4	61,2	15	0,20	0,6	60	28	4,5	210	420	Отверстия с окаймлением и парными ребрами жесткости
БГС-5	61,2	15	0,20	0,6	60	28	4,5	210	420	Отверстия с загибом окаймления и парными ребрами жесткости

Для исследуемых образцов получены зависимости «нагрузка – перемещение» в середине испытанных образцов двутавров типов БГС, по которым можно оценить работоспособность балок с различными методами усиления отверстий.

Экспериментальные величины прогибов моделей в пределах упругой работы материала без ослаблений и с ослаблениями сравнивались с теоретическими и компьютерными определенными для расчетной схемы балки, в которой учитывались действительные размеры прогибов.

Экспериментальные значения перемещения балок в вертикальной плоскости в каждом сечении вычислялись по формуле (45):

$$y_i = \frac{A_{п-3} + A_{п-4}}{2} - \left[\left(\frac{A_{п-1} + A_{п-2}}{2} + \frac{A_{п-5} + A_{п-6}}{2} \right) / 2 \right], \quad (45)$$

где $A_{п-3}, A_{п-4}$ – разность по прогибомерам, установленным в сечении, где вычислялись перемещения;

$A_{п-1}, A_{п-2}$ – разность по прогибомерам, на левой опоре балки;

$A_{п-5}, A_{п-6}$ – разность по прогибомерам, на правой опоре балки.

Экспериментальные величины прогибов моделей балок с отверстиями сравнивались с теоретическими и компьютерными данными, а также с данными полученными для балки без отверстий.

Испытания моделей БГС–1, БГС–2, БГС–3 и БГС–4 продолжались до момента исчерпания несущей способности вследствие потери устойчивости гофрированной стенки или полки, модели БГС–5 до начала работы балки в упруго-пластической зоне.

До начала основного испытания каждая балка загружалась по пять раз до нагрузки 35 кН. Загрузка производилась ступенями, величина которых составляла 10 кН на первых двух ступенях и по 5 кН на последующих трех.

Для модели балки длиной $l = 4200$ мм максимально допустимый прогиб равен $1/(170 \times l)$ или 25 мм.

5.3 Оценка влияния особенностей конструктивной формы подкрепления отверстий на несущую способность балок

Проведенные экспериментальные исследования моделей позволили установить основные характеристики несущей способности и деформативности и определить особенности потери устойчивости полок и гофрированных стенок при различных способах их подкрепления.

В таблице 42 приведены полученные теоретические, компьютерные [154] и экспериментальные значения прогибов рассматриваемых балок, а также величины относительных прогибов. А в таблице 43 приведен анализ полученных данных.

Таблица 42 – Полученные теоретические, компьютерные и экспериментальные значения прогибов

Экспериментальная нагрузка F_3 от F_p ,	Нагрузка F_p в кН	БГС-1				БГС-2			БГС-3			БГС-4			БГС-5		
		Теорет.	Комп.	Экспер	Деформ	Комп.	Экспер.	Деформ	Комп.	Экспер	Деформ	Комп.	Экспер.	Деформ	Комп.	Экспер	Деформ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0,167 F_p	10	0,54	0,55	0,47	//8936	2,51	2,5	//1680	0,60	0,57	//7368	0,62	0,57	//7368	0,56	0,49	//8571
0,333 F_p	20	1,07	1,08	0,97	//4330	5,03	4,8	//875	1,20	1,08	//3889	1,24	1,13	//3717	1,09	0,98	//4286
0,417 F_p	25	1,34	1,36	1,24	//3387	6,28	6,1	//689	1,51	1,35	//3111	1,55	1,39	//3022	1,37	1,25	//3360
0,5 F_p	30	1,61	1,62	1,46	//2877	7,54	7,29	//576	1,81	1,62	//2593	1,86	1,67	//2515	1,63	1,47	//2857
0,583 F_p	35	1,88	1,90	1,72	//2442	8,80	8,67	//484	2,11	1,89	//2222	2,17	1,94	//2165	1,91	1,73	//2428
0,667 F_p	40	2,14	2,16	1,95	//2154	10,05	10,02	//419	2,41	2,20	//1909	2,48	2,22	//1892	2,18	1,96	//2143
0,750 F_p	45	2,41	2,44	2,22	//1892	11,81	11,28	//372	2,71	2,53	//1660	2,79	2,50	//1680	2,45	2,24	//1875
0,833 F_p	50	2,68	2,71	2,47	1700	12,56	12,76	//329	3,01	2,84	//1479	3,10	2,80	//1500	2,73	2,46	//1707
0,867 F_p	52	–	–	–	–	13,07	15,29	//275	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,900 F_p	54	–	–	–	–	13,57	17,0	//247	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,917 F_p	55	2,95	2,98	2,74	//1533	–	–	–	3,32	3,2	//1313	3,41	3,10	//1355	3,00	2,71	//1550
F_p	60	3,22	3,25	2,95	//1424	–	–	–	3,62	3,56	//1180	3,72	3,44	//1221	3,28	2,96	//1419
1,03 $F_p \rightarrow$ 0,833 F_p	62 \rightarrow 50	–	–	–	–	15,58	20,85	//201	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,083 F_p	65	3,48	3,52	3,20	//1313	–	–	–	3,92	3,94	//1066	4,03	3,75	//1120	3,55	3,20	//1313
1,167 F_p	70	3,75	3,79	3,47	//1210	–	–	–	4,22	4,21	//998	4,34	4,07	//1032	3,82	3,44	//1221
1,250 F_p	75	4,02	4,07	3,77	//1114	–	–	–	4,52	4,62	//909	4,65	4,40	//955	4,1	3,69	//1138
1,333 F_p	80	4,29	4,34	4,06	//1034	–	–	–	4,82	4,99	//842	4,96	4,81	//873	4,37	3,95	//1063
1,417 F_p	85	4,55	4,61	4,39	//957	–	–	–	5,13	5,23	//803	5,27	5,25	//800	4,64	4,19	//1002

Продолжение таблицы 42

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1,50F _p	90	4,82	4,88	4,71	l/892	–	–	–	5,43	5,55	l/757	5,58	5,76	l/729	4,92	4,5	l/933
1,583F _p	95	5,09	5,15	5,03	l/835	–	–	–	5,73	5,82	l/722	5,89	6,23	l/674	5,19	4,82	l/871
1,667F _p	100	5,36	5,42	5,44	l/772	–	–	–	6,03	6,14	l/684	6,20	6,85	l/613	5,46	5,49	l/765
1750F _p	105	5,63	5,69	6,01	l/699	–	–	–	6,33	6,52	l/644	6,51	7,24	l/580	5,73	5,84	l/719
2,183F _p	110	5,89	5,97	6,37	l/659	–	–	–	6,63	6,94	l/605	6,82	7,95	l/528	6,0	6,24	l/673
1,917F _p	115	6,16	6,24	6,80	l/618	–	–	–	6,93	7,44	l/565	7,13	8,53	l/492	6,28	6,66	l/631
2F _p	120	6,43	6,51	7,39	l/568	–	–	–	7,24	7,97	l/527	7,44	9,5	l/442	6,55	7,12	l/590
2,083F _p	125	6,70	6,78	7,64	l/550	–	–	–	7,54	8,54	l/492	7,75	10,32	l/407	6,83	7,62	l/551
2,167F _p	130	6,97	7,05	8,12	l/517	–	–	–	7,84	9,20	l/457	8,06	11,31	l/371	7,1	7,82	l/537
2,250F _p	135	7,23	7,32	8,62	l/487	–	–	–	8,14	9,93	l/423	8,37	12,33	341	7,37	8,35	l/503
2,333F _p	140	7,50	7,59	9,3	452	–	–	–	8,44	10,66	l/394	8,67	13,84	l/303	7,65	8,99	l/467
2,417F _p	145	7,77	7,86	10,23	l/411	–	–	–				8,98	18,59	l/226	7,92	9,75	l/431
2,417F _p → 2,250F _p	145→135					–	–	–	8,74	12,09	l/347						
2,5F _p	150					–	–	–				9,29	20,49	l/205	8,19	10,65	l/394
2,5F _p → 2,083F _p	150→125	8,04	8,13	13,28	l/316	–	–	–									
2,55F _p → 2,250F _p	153→135					–	–	–				9,48	23,70	l/177			

Таблица 43 – Результаты анализа полученных данных

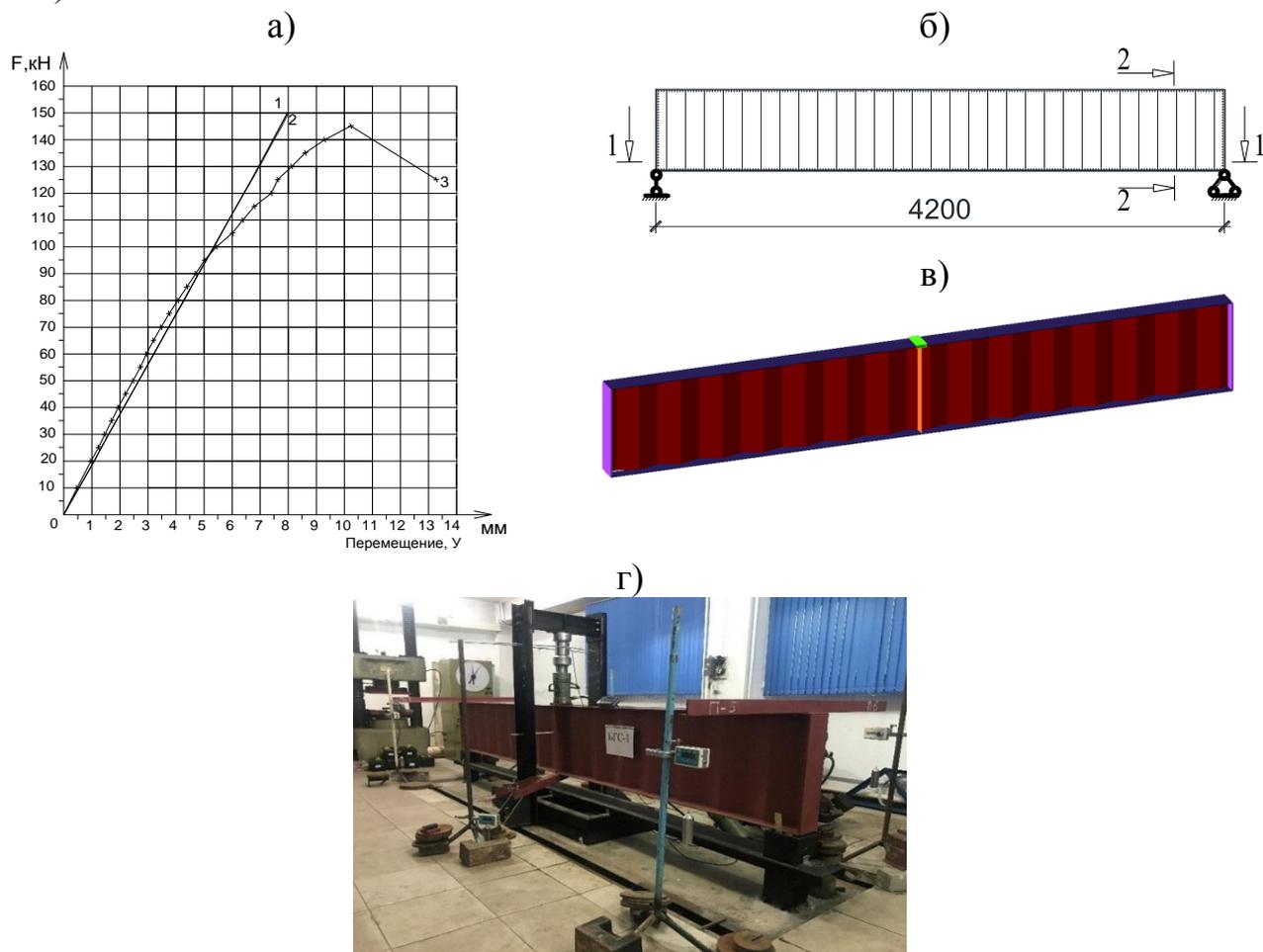
Обозначение модели	Расчетная нагрузка, F_p тс/кН	Предельная расчетная нагрузка $F_{p,max}$ тс/кН	Предельная достигнутая экспериментальная нагрузка $F_{э,max}$ тс/кН	Прогиб в середине пролета по экспериментальным данным, мм		Прогиб в середине пролета по данным компьютерного моделирования, мм		Прогиб в середине пролета по данным теоретического расчета, мм		Разница экспериментальных, компьютерных и теоретических данных прогибов, %			Характер разрушения образцов
				$U_э$ от $F_{p,max}$	$U_{э,max}$ от $F_{э,max}$	$U_к$ от $F_{p,max}$	$U_{к,max}$ от $F_{э,max}$	$U_т$ от $F_{p,max}$	$U_{т,max}$ от $F_{э,max}$	$U_к/U_э$	$U_т/U_э$	$U_к/U_т$	
БГС–1	6/60	10/100	150	5.44	13,28	5.42	8,13	5.36	8.04	0,37	1,5	1,1	Потеря местной устойчивости сжатого пояса и местной устойчивости стенки
БГС–2	6/60	60	62	12.76	20.85	12.56	15.58			1,57			Общая потеря устойчивости стенки
БГС–3	6/60	10/100	145	6.14	12.09	6.03	8.74			1,79			Потеря местной устойчивости сжатого пояса
БГС–4	6/60	9.5/95	153	6.23	23.70	5.89	9.48			5,46			Потеря местной устойчивости сжатого пояса, местной устойчивости стенки, деформация окаймления
БГС–5	6/60	10/100	150	5.49	10.65	5.46	8.19			0,55			Развитие чрезмерных пластических деформаций

В таблице 43 представлены величины полученных прогибов $U_{\text{э}}$ и $U_{\text{э,max}}$ от предельной расчетной нагрузки для экспериментальных моделей в упругой стадии работы стали $F_{p,max}$ и от предельной достигнутой экспериментальной нагрузки $F_{\text{э,max}}$, прогибы $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{к,max}}$ полученные путем компьютерного моделирования балок, выполненных в программном комплексе ЛИРА – САПР 2017, там же приведены теоретические значения прогибов в середине пролета $U_{\text{т}}$ и $U_{\text{т,max}}$. Также в таблице приведены разница экспериментальных, компьютерных и теоретических данных $U_{\text{к}}/U_{\text{э}}$, $U_{\text{т}}/U_{\text{э}}$ и $U_{\text{к}}/U_{\text{т}}$.

Разница между компьютерными и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла составляет от 0,37 до 5,5% для всех исследованных моделей.

Разница между теоретическими и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла составляет 1,5% для модели БГС–1.

При испытании (рисунок 80, г) модели БГС–1 (рисунок 80 б, в) (без отверстий) до нагрузки $0,66F_{\text{э,max}}$ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между приращением силы и прогибом середины модели ($F-U$) (рисунок 80 а).



а) графики «нагрузка – перемещение» соответственно (1), (2) и (3) для теоретических, компьютерных и экспериментальных данных; б) чертеж балки БГС–1; в) компьютерная модель балки БГС–1; г) общий вид установки для испытания балки БГС–1

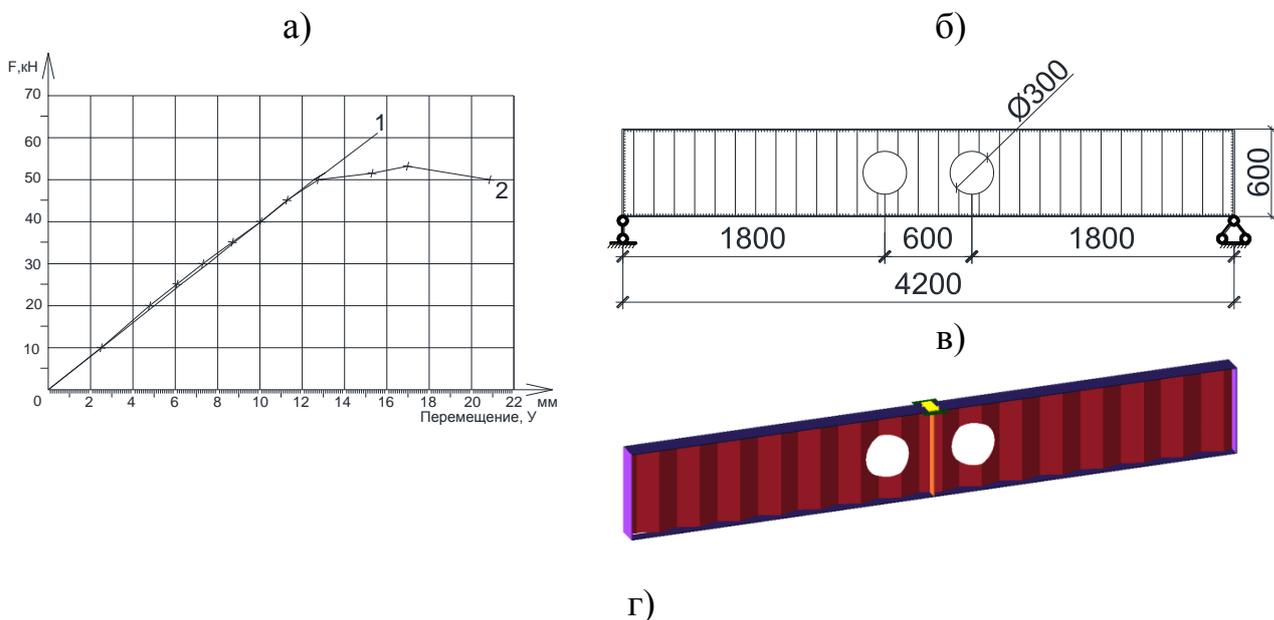
Рисунок 80 – Испытание модели БГС–1

В дальнейшем эта зависимость становилась нелинейной. При нагрузке $F_э = 115-120$ кН замечено начало текучести нижнего растянутого пояса. При нагрузке $F_э = 140$ кН появился пропелерообразный изгиб верхнего пояса. В стенке центральной части балки около верхнего пояса чуть-чуть наметилась местная потеря устойчивости плоскости гофров. Снижение несущей способности модели БГС-1 происходило вследствие местной потери устойчивости сжатого пояса с падением нагрузки с $F_{э,max} = 150$ кН до $F_э = 125$ кН (рисунок 81).



Рисунок 81 – Характер исчерпания несущей способности образца БГС-1 в виде потери местной устойчивости сжатого пояса

При испытании (рисунок 82, г) модели БГС–2 (рисунок 82, б, в) (с отверстиями без подкрепления) до нагрузки $0,8F_{э,мах}$ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между приращением силы и прогибом середины модели ($F-U$) (рисунок 82, а) Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/201l$.



а) графики «нагрузка – перемещение» соответственно (1) и (2) компьютерных и экспериментальных данных; б) чертёж балки БГС–2; в) компьютерная модель балки БГС–2; г) общий вид установки для испытания балки БГС–2

Рисунок 82 – Испытание модели БГС–2

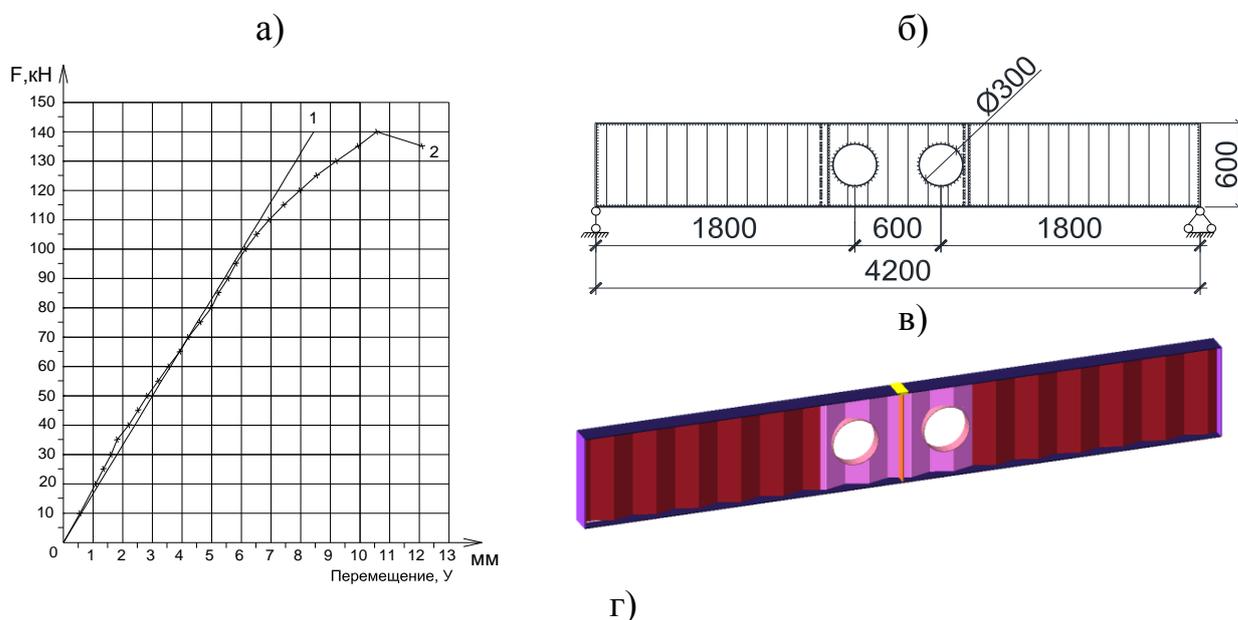
В дальнейшем эта зависимость становилась нелинейной. Произошла местная потеря устойчивости плоскости гофра выше и ниже середины высоты стенки около отверстий с обеих сторон. С противоположной стороны отверстия также наметилась местная потеря устойчивости плоскости гофров. При дальнейшем увеличении нагрузки до $F_3 = 52$ кН произошел выгиб панелей гофров

из плоскости стенки, а пояса S – образно изогнулись в своей плоскости. При нагрузке $F_{э, max} = 62$ кН и прогибе $U = 20,85$ мм произошла общая потеря устойчивости гофрированной стенки с падением нагрузки до $F_э = 52$ кН. Круглое отверстие превратилось в эллипс, вытянутый вдоль растянутой диагонали стенки модели (рисунок 83).



Рисунок 83 – Характер исчерпания несущей способности образца БГС–2 в виде потери местной устойчивости отдельных плоскостей гофров, пропелерообразный изгиб сжатого пояса и потеря его устойчивости, текучесть нижнего пояса

При испытании (рисунок 84, г) модели БГС–3 (рисунок 84, б, в) стенки которой ослаблены окаймленными круглыми отверстиями с утолщением стенки в зоне отверстия в два раза до нагрузки $0,69F_{э,мах}$ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между приращением силы и прогибом середины модели ($F-U$) (рисунок 84, а). Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/347l$.



а) графики «нагрузка–перемещение» соответственно (1) и (2) компьютерных и экспериментальных данных; б) чертеж балки БГС–3; в) компьютерная модель балки БГС–3; г) общий вид установки для испытания балки БГС–3
Рисунок 84 – Испытание модели БГС–3

Снижение несущей способности модели происходило вследствие начала текучести нижнего растянутого пояса и появления пропелеобразного прогиба верхнего сжатого пояса при нагрузке $F_{э,мах} = 115-120$ кН. При увеличении нагрузки до $F_{э,мах} = 145$ кН произошла местная потеря устойчивости сжатого

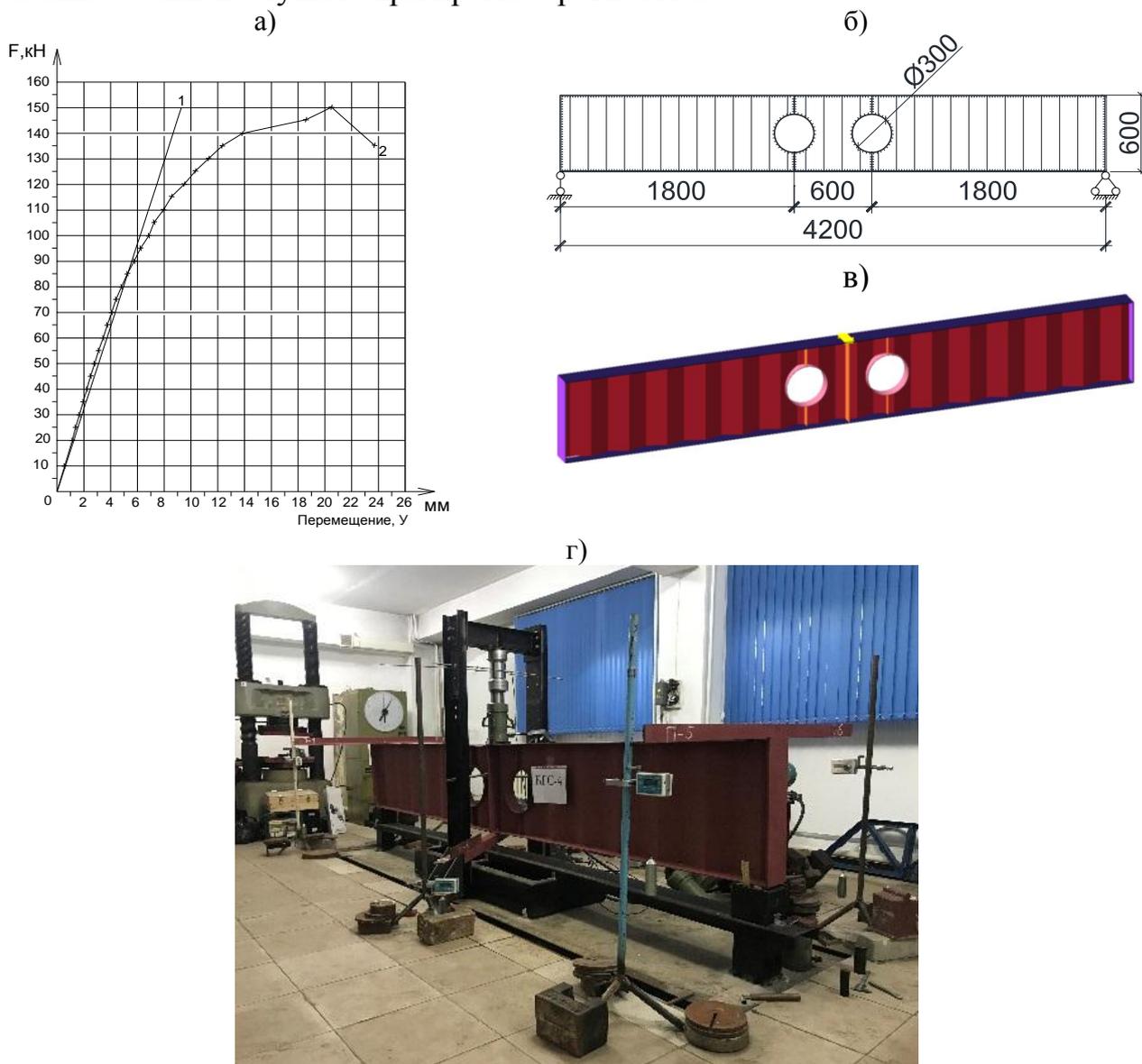
пояса. При дальнейшем увеличении прогиба $U = 12,09$ мм нагрузка стала снижаться до $F_3 = 135$ кН (рисунок 85). Видимых деформаций в зоне отверстия и его подкрепления не выявлено.



Рисунок 85 – Характер исчерпания несущей способности образца БГС–3 в виде потери местной устойчивости сжатого пояса

При испытании (рисунок 86, г) модели БГС–4 (рисунок 86, б, в), стенки которых ослаблены окаймленными круглыми отверстиями с подкреплением дополнительными вертикальными парными ребрами жесткости до нагрузки $0,62F_{э,мах}$ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между прираще-

нием силы и прогибом середины модели (F – Y) (рисунок 86, а). Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/177l$.



а) графики «нагрузка–перемещение» соответственно (1), (2) для компьютерных и экспериментальных данных;
 б) чертеж балки БГС–4; в) компьютерная модель балки БГС–4;
 г) общий вид установки для испытания балки БГС–4
 Рисунок 86– Испытание модели БГС–4

При нагрузке $F_3 = 115$ – 120 кН произошло начало текучести нижнего пояса. В процессе нагружения модели происходил постепенный выгиб окаймления отверстия из плоскости стенки, который при нагрузке $F_3 = 135$ кН составлял около 10 мм. Снижение несущей способности произошло вследствие общей потери устойчивости стенки справа и слева от отверстия на участках, примыкающих к обрамлению. При нагрузке $F_3 = 140$ кН появился пропелерообразный изгиб верхнего пояса. Снижение несущей способности модели БГС–4 происходило вследствие местной потери устойчивости сжатого пояса с падением нагрузки с $F_{3,max} = 153$ кН до $F_3 = 135$ кН при прогибе $Y = 23,7$ мм (рисунок 87). Отверстие

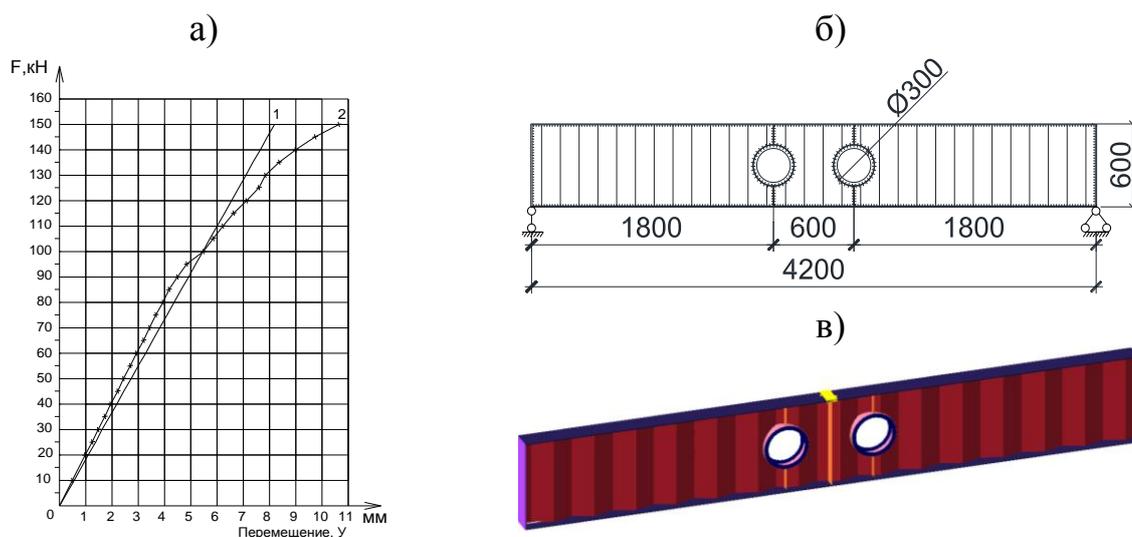
из круглого превратилось, в эллипс, обрамляющий лист потерял устойчивость по S –образной форме.



Рисунок 87 – Характер исчерпания несущей способности образца БГС–4 в виде потери местной устойчивости отдельных плоскостей гофров, пропелерообразный изгиб сжатого пояса и потеря его устойчивости, текучесть нижнего пояса, выгиб окаймления из плоскости стенки

При испытании (рисунок 88, г) модели БГС–5 (рисунок 88, б, в) стенки которой ослаблены окаймленными круглыми отверстиями с загибом окаймления и подкреплены дополнительными вертикальными парными ребрами жесткости до нагрузки $0,63F_{э,мах}$ наблюдалась прямая пропорциональная зависи-

мость между приращением силы и прогибом середины модели (F – Y) (рисунок 88, а). Предельное состояние балки при прогибе равном $l/394l$ не наступило.



г)



а) графики «нагрузка–перемещение» соответственно (1), (2) для компьютерных и экспериментальных данных; б) чертеж балки БГС–5; в) компьютерная модель балки БГС–5; г) общий вид установки для испытания балки БГС–5

Рисунок 88 – Испытание модели БГС–5

При нагрузке $F_9 = 120$ кН было замечено начало текучести нижнего пояса. При нагрузке $F_9 = 140$ кН появился пропелерообразный изгиб верхнего пояса. Увеличение деформативности модели БГС–5 в вертикальной плоскости было обусловлено развитием пластических деформаций растянутого нижнего пояса. Поскольку видимых нарушений, отслоений краски, деформаций в зоне отверстия и его подкрепления выявлено не было, максимальная нагрузка на балку осталась равной с $F_{э, max} = 150$ кН (рисунок 89).



Рисунок 89 – Характер исчерпания несущей способности образца БГС–5 в виде небольшого пропелерообразного изгиба сжатого пояса

5.4 Дисперсионный анализ полученных данных

В соответствии с программой эксперимента [155] первоначально были проведены испытания моделей БГС–1, БГС–2, БГС–3, БГС–4 и БГС–5 при различных параметрах подкрепления отверстий в гофрированной стенке.

В таблице 48 приведены выборки экспериментальных величин прогибов для выполнения дисперсионного анализа однофакторного эксперимента. При анализе влияния видов подкрепления отверстий на деформативность моделей для получения достаточно точных данных были приняты величины прогибов при нагрузке от $F_3 = 10$ кН до $F_3 = 35$ кН (упругая стадия работы стали). Каждое значение прогибов в ячейке X_{ij} таблицы 48 представляет собой среднеарифметическую величину прогиба пятикратных пробных загрузений всех моделей балок на начальных стадиях экспериментальных работ.

Математическая модель эксперимента имеет вид формулы (46):

$$X_{ij} = \mu + T_i + E_{ij} \quad (46)$$

где X_{ij} – измеряемая величина;

μ – общий эффект всего эксперимента;

T_j – эффект j -го уровня;

E_{ij} – соответствует случайной ошибке в ячейке.

В таблицах 44 и 45 представлен дисперсионный анализ прогибов моделей БГС–1 и БГС–2.

Таблица 44 – Выборка экспериментальных данных прогибов (мм) моделей БГС–1 и БГС–2 для проведения дисперсионного анализа однофакторного эксперимента

Изучаемый параметр	Экспериментальная нагрузка	Особенности подкрепления отверстий		ΣT_j	
		Без отверстий	Без подкрепления		
Деформативность	10 кН		0.49	2.5	2.99
			0.47	2.51	2.98
			0.47	2.54	3.01
			0.47	2.49	2.96
			0.47	2.47	2.94
		ΣT_j	2.37	12.51	14.88
		ΣT_i^2	1.12	31.30	32.43
	35 кН		1.77	8.72	10.49
			1.74	8.68	10.42
			1.72	8.76	10.48
			1.71	8.74	10.45
			1.73	8.7	10.43
		ΣT_j	8.67	43.6	52.27
		ΣT_i^2	15.04	380.20	395.23

Таблица 45 – Результаты дисперсионного анализа однофакторного эксперимента моделей БГС–1 и БГС–2 для определения критерия F_1

Изучаемый параметр	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Деформативность при нагрузке 10 кН	Тип подкрепления	1	10.28	10.3
	Ошибка E_{ij}	4	0.003	0.0008
Деформативность при нагрузке 35 кН	Тип подкрепления	1	122.01	122.0
	Ошибка E_{ij}	4	0.006	0.002

Поскольку параметры не подкрепленного отверстия, как факторы экспериментов фиксированы, все проверки статистической значимости основаны на F –статистике, в знаменателе которой стоит средний квадрат ошибки.

Используя полученные в таблице 45 результаты, проверяем гипотезы $H_{0,1}$:

1) $T_j = 0$ для всех, т.е. нет влияния наличия неподкрепленного отверстия в балке на деформативность модели при разных нагрузках:

– для деформативности при нагрузке 10 кН:

$F_{1,4} = \frac{10,3}{0,0008} = 12875 > 21,2$ – гипотеза отвергается, величина высоко значима при 1% уровне значимости.

– для деформативности при нагрузке 35 кН:

$F_{1,4} = \frac{122}{0,002} = 61000 > 21,2$ – гипотеза также отвергается, величина очень высоко значима при 1% уровне значимости.

Результаты показывают очень высокую статистическую значимость зависимости величин деформативности от наличия неподкрепленных отверстий модели БГС–2, ослабляющих стенку.

В таблицах 46 и 47 представлен дисперсионный анализ прогибов моделей БГС–1 и БГС–3.

Таблица 46 – Выборка экспериментальных данных прогибов (мм) моделей БГС–1 и БГС–3 для проведения дисперсионного анализа однофакторного эксперимента

Изучаемый параметр	Экспериментальная нагрузка	Особенности подкрепления отверстий		ΣTj
		Без отверстий	Подкрепление двойной стенкой	
Деформативность	10 кН	0.49	0.58	1.07
		0.47	0.57	1.04
		0.47	0.57	1.04
		0.47	0.57	1.04
		0.47	0.56	1.03
	ΣTj	2.37	2.85	5.22
	ΣTi^2	1.12	1.62	2.75
	35 кН	1.77	1.88	3.65
		1.74	1.86	3.6
		1.72	1.87	3.59
		1.71	1.89	3.6
		1.73	1.88	3.61
	ΣTj	8.67	9.38	18.05
ΣTi^2	15.04	17.60	32.63	

Таблица 47 – Результаты дисперсионного анализа однофакторного эксперимента моделей БГС–1 и БГС–3

Изучаемый параметр	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Деформативность при нагрузке 10 кН	Тип подкрепления	1	0.02	0.0230
	Ошибка E_{ij}	4	0.001	0.00013
Деформативность при нагрузке 35 кН	Тип подкрепления	1	0.05	0.0504
	Ошибка E_{ij}	4	0.003	0.00066

Поскольку параметры подкрепленного двойной стенкой отверстия, как факторы экспериментов фиксированы, все проверки статистической значимости основаны на F –статистике, в знаменателе которой стоит средний квадрат ошибки.

Используя полученные в таблице 47 результаты, проверяем гипотезы $H_{0,1}$:

3) $T_j = 0$ для всех, т.е. нет влияния наличия подкрепления отверстий двойной по толщине стенкой на деформативность модели при разных нагрузках:

– для деформативности при нагрузке 10 кН:

$F_{1,4} = \frac{0,023}{0,00013} = 177 > 21,2$ – гипотеза отвергается, величина высоко значима при 1% уровне значимости.

– для деформативности при нагрузке 35 кН:

$F_{1,4} = \frac{0,0504}{0,0007} = 76,36 > 21,2$ – гипотеза также отвергается, величина значима при 1% уровне значимости.

Результаты показывают высокую статистическую значимость зависимости величин деформативности от подкрепления двойной стенкой модели БГС–3, ослабляющих стенку. Однако с увеличением нагрузка данная значимость уменьшается.

В таблицах 48 и 49 представлен дисперсионный анализ прогибов моделей БГС–1 и БГС–4.

Таблица 48 – Выборка экспериментальных данных прогибов (мм) моделей БГС–1 и БГС–4 для проведения дисперсионного анализа

Изучаемый параметр	Экспериментальная нагрузка	Особенности подкрепления отверстий		ΣT_j
		Без отверстий	Подкрепление окаймлением и ребрами жесткости	
1	2	3	4	5
	10 кН	0.49	0.61	1.1

Продолжение таблицы 48

1	2	3	4	5	
		0.47	0.54	1.01	
		0.47	0.58	1.05	
		0.47	0.57	1.04	
		0.47	0.57	1.04	
		ΣT_j	2.37	2.87	5.24
		ΣT_i^2	1.12	1.65	2.77
	35 кН		1.77	1.97	3.74
			1.74	1.91	3.65
			1.72	1.95	3.67
			1.71	1.94	3.65
			1.73	1.93	3.66
		ΣT_j	8.67	9.7	18.37
		ΣT_i^2	15.04	18.82	33.86

Таблица 49 – Результаты дисперсионного анализа однофакторного эксперимента моделей БГС–1 и БГС–4

Изучаемый параметр	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Деформативность при нагрузке 10 кН	Тип подкрепления	1	0.02	0.025
	Ошибка E_{ij}	4	0.003	0.0007
Деформативность при нагрузке 35 кН	Тип подкрепления	1	0.11	0.1
	Ошибка E_{ij}	4	0.004	0.001

Используя полученные в таблице 49 значения, проверяем гипотезы $H_{0,1}$:

1) $T_j = 0$ для всех, т.е. нет влияния подкрепления окаймлением и парными параллельными ребрами жесткости на деформативность моделей при разных нагрузках:

– для деформативности при нагрузке 10 кН:

$F_{1,4} = \frac{0,025}{0,0007} = 35,7 > 21,2$ – гипотеза отвергается, величина значима при 1% уровне значимости.

– для деформативности при нагрузке 35 кН:

$F_{1,4} = \frac{0,106}{0,001} = 103 > 30,8$ – гипотеза также отвергается, величина высоко значима при 1% уровне значимости.

Результаты показывают высокую статистическую значимость зависимости величин деформативности от отверстий, подкрепленных окаймлением и пар-

ными параллельными ребрами жесткости, ослабляющих стенку. С увеличением нагрузки данная значимость также увеличивается.

В таблицах 50 и 51 представлен дисперсионный анализ прогибов моделей БГС–1 и БГС–5.

Таблица 50 – Выборка экспериментальных данных прогибов (мм) моделей БГС–1 и БГС–5 для проведения дисперсионного анализа однофакторного эксперимента

Изучаемый параметр	Экспериментальная нагрузка	Особенности подкрепления отверстий		ΣT_j
		Без отверстий	Подкреплением окаймлением с загибом и ребрами жесткости	
Деформативность	10 кН	0.49	0.52	1.01
		0.47	0.53	1,00
		0.47	0.55	1.02
		0.47	0.56	1.03
		0.47	0.55	1.02
	ΣT_j	2.37	2.71	5.08
	ΣT_i^2	1.12	1.47	2.59
	35 кН	1.77	1.73	3.50
		1.74	1.74	3.48
		1.72	1.76	3.48
		1.71	1.75	3.46
		1.73	1.75	3.48
	ΣT_j	8.67	8.73	17.40
	ΣT_i^2	15.04	15.24	30.28

Таблица 51 – Результаты дисперсионного анализа однофакторного эксперимента моделей БГС–1 и БГС–5

Изучаемый параметр	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Деформативность при нагрузке 10	Тип подкрепления	1	0.01	0.012
	Ошибка E_{ij}	4	0.001	0.0004
Деформативность при нагрузке 35	Тип подкрепления	1	0.0004	0.0004
	Ошибка E_{ij}	4	0.003	0.001

Используя полученные в таблице 51 значения, проверяем гипотезы $H_{0,1}$:

$T_j = 0$ для всех, т.е. нет влияния подкрепления окаймлением с загибом и ребрами жесткости на деформативность моделей при разных нагрузках:

– для деформативности при нагрузке 10 кН:

$$F_{1,4} = \frac{0,012}{0,0004} = 30 > 22,2 \text{ – гипотеза отвергается, величина значима при 1\%}$$

уровне значимости.

– для деформативности при нагрузке 35 кН:

$$F_{1,4} = \frac{0,0004}{0,001} = 0,4 < 7,71 \text{ – гипотеза верна.}$$

Результаты при нагрузке 10 кН показывают статистическую значимость зависимости величин деформативности от отверстий, подкреплённых окаймлением с загибом и ребрами жесткости, ослабляющих стенку. Однако с увеличением нагрузки до 35 кН данная значимость уже отсутствует.

По проведенному дисперсионному анализу однофакторного эксперимента моделей БГС–1, БГС–2, БГС–3, БГС–4 и БГС–5 в общем было выявлена статистическая значимость зависимости величин деформативности от отверстий, в том числе подкрепленных различными способами. Однако сравнительный анализ всех балок, имеющих отверстия, с балкой без отверстия подтвердил, что эффективность полученных экспериментальных данных о модели БГС–5 при нагрузке 35 кН и выше, а также модели БГС–3 которая при увеличении нагрузке от 10 кН до 35 кН показала результат уменьшения зависимости деформативности от вида подкрепления, что дает основания полагать, что с увеличением нагрузки зависимость будет полностью отсутствовать или будет сведена к минимуму.

Выполненный дисперсионный анализ позволяет сделать выводы о необходимости разработки рекомендаций для внесения двух предложенных вариантов усиления отверстий моделей БГС–3 [156] и БГС–5 [157] в соответствующие правила нормы проектирования подобных конструкций.

В целом проведенные испытания показали необходимость и экономическую целесообразность проведенных экспериментальных работ по выявлению оптимальных способов подкрепления отверстий, в целях удовлетворения требованиям технологов по пропуску оборудования в пределах строительной высоты балок, снижения расхода стали на их подкрепление и уменьшение трудоемкости изготовления.

5.5 Экономическая эффективность расхода стали на усиление отверстий

Для подсчета экономической эффективности необходим расчет по расходу стали на различные способы усиления отверстий.

Площадь окаймления принята равной площади отверстия. Ширина окаймления и ребер жесткости 80 мм. Толщина металла окаймления и ребер жесткости принята 4 мм. Толщина стенки t_w – 2 мм. В зоне отверстия утолщения стенки принято $2t_w$. Загиб внешней грани окаймления толщиной t – 3 мм и высотой h – 25 мм.

В таблице 52 показан расход металла на усиления двух отверстий моделей балок, с различными способами их подкрепления.

Таблица 52 – Расход металла на усиление двух отверстий

Диаметр отверстия	Масса металла, (кг)						
	Масса балки без отверстия	Масса балки с неподкрепленными отверстиями	Масса окаймления	Масса утолщенной стенки на $2t_w$.	Окаймление + рёбра жесткости	Окаймление + утолщение стенки на $2t_w$.	Окаймление + рёбра жесткости + загиб окаймления
0,5 h_w	118,4	116	4,74	15,2	7,7	19,94	9,916

Сравнивая полученные данные можно сделать следующие выводы: для усиления балки с гофрированной стенкой, ослабленной двумя круглыми отверстиями диаметром $0,5 h_w$ при использовании варианта усиления отверстий окаймлением с ребрами жесткости (БГС–4) масса металла балки по увеличивается на 6,6%, по сравнению с балкой БГС–2 с неподкрепленными отверстиями; при использовании варианта усиления отверстий окаймлением с утолщением стенки $2t_w$ (БГС–3)– масса увеличивается на 17,2 %; при использовании варианта усиления окаймлением с ребрами жесткости с загибом окаймления (БГС–5) масса увеличивается на 8,5 %.

Таким образом, наиболее экономически эффективными способами усиления отверстий, с точки зрения экономии металла можно считать вариант принятый для балок БГС–4 и БГС–5.

Выводы по 5 разделу

По проведенным испытаниям моделей балок с тонкими ($\lambda_w = 300$) гофрированными стенками, можно сделать следующие выводы:

1. Предельная экспериментальная нагрузка всегда была выше расчетной для всех типов балок с гофрированной стенкой, что говорит о высокой надежности всех элементов конструкций, за исключением модели балки БГС–2, стенка которой ослаблена двумя отверстиями без подкрепления.

2. Исчерпание несущей способности моделей балок стало возможным вследствие следующих основных причин:

- потеря местной устойчивости плоскостей гофров, примыкающих к отверстию;
- потеря местной устойчивости сжатого верхнего пояса;
- общая и местная потеря устойчивости стенки;
- повышенная деформативность;
- развитие пластических деформаций растянутого нижнего пояса;
- выгиб окаймления из плоскости стенки.

3. Испытание модели балки БГС–1 показало, что предельное состояние балки наступило при прогибе равном $1/316 L$ и максимальной сосредоточенной нагрузке 15 т, вследствие потери местной устойчивости сжатого пояса.

4. При ослаблении гофрированных стенок модели балки БГС–2 с не подкрепленными отверстиями их несущая способность на сдвиг составила всего лишь 41% от несущей способности модели балки БГС–1 с неослабленной стенкой, при значительном увеличении (более чем в 6 раз) деформативности. Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/201$ L и максимальной сосредоточенной нагрузке 6,2 т, вследствие потери местной устойчивости отдельных плоскостей гофров, пропелерообразного изгиба сжатого пояса, потерей его устойчивости, а также текучести нижнего пояса.

5. Применение совершенствованных форм усиления отверстий в модели балки БГС–3 путем двукратного утолщения стенки в области отверстия совместно с окаймлением уменьшило деформативность модели в 1,1 раза, по сравнению с моделью без отверстия БГС–1. То есть, примененный метод подкрепления отверстия оказался эффективнее, как с точки зрения деформативности, так и трудоемкости, так как изготовление данной модели менее трудоемко, по сравнению с другими вариантами. Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/347$ L и максимальной сосредоточенной нагрузке 14,5 т, вследствие потери местной устойчивости сжатого пояса.

6. Испытание модели БГС–4, способ подкрепления отверстий которой описан в существующих нормативных документах, состоит из окаймления из листовой стали и парных вертикальных ребер жесткости. Модель балки показала результат несколько ниже ожидаемого, так, например, деформативность модели в 1,78 раза больше результатов модели БГС–1 и в 1,96 раза больше полученных результатов модели БГС–3. Предельное состояние балки наступило при прогибе равном $l/177$ L и максимальной сосредоточенной нагрузке 15,3 т, вследствие потери местной устойчивости отдельных плоскостей гофр, пропелерообразного изгиба сжатого пояса и потерей его устойчивости, текучести нижнего пояса и выгиба окаймления из плоскости стенки.

7. Испытанная модель балки БГС–5 показала себя самой эффективной. Отверстия балки подкреплены окаймлением из листовой стали с загибом окаймления и парными вертикальными ребрами жесткости. Так при нагружении балки до 15 т, видимых дефектов в работе балки обнаружено не было, деформативность балки в 1,25 раза меньше, чем для модели балки БГС–1, в 1,13 раза меньше модели балки БГС–3 и в 2,22 раза меньше модели БГС–4. Предельное состояние балки при прогибе равном $l/394$ L и максимальной сосредоточенной нагрузке 15 т не наступило. Характер исчерпания несущей способности модели балки в виде небольшого пропелерообразного изгиба сжатого пояса.

8. Разница между компьютерными и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла составляет от 0,37 до 5,5% для всех исследованных моделей, что подтверждает надежность выбранной расчетной программы. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла для модели БГС–1 составляет 1,5%.

9. Назначение оптимальных способов подкрепления отверстий позволило обеспечить необходимую несущую способность и деформативность балок с

гофрированными стенками, а также обозначена возможность применения их в качестве несущих элементов покрытий и перекрытий, ригелей рамных каркасов одноэтажных и многоэтажных зданий различного назначения.

10. По проведенному дисперсионному анализу однофакторного эксперимента моделей БГС–1, БГС–2, БГС–3, БГС–4 и БГС–5, в общем, была выявлена статистическая значимость зависимости величин деформативности от наличия отверстий, в том числе подкрепленных различными способами. Однако сравнительный анализ всех балок, имеющих отверстия, с балкой без отверстия подтвердил, что эффективность полученных экспериментальных данных о модели БГС–5 при нагрузке 35 кН и выше, а также модели БГС–3 которая при увеличении нагрузке от 10 кН до 35 кН показала результат уменьшения зависимости деформативности от варианта подкрепления, что дает основания полагать, что с увеличением нагрузки зависимость будет полностью отсутствовать или будет сведена к минимуму.

11. Выполненный дисперсионный анализ позволяет сделать выводы об эффективности усовершенствованных моделей БГС–3 и БГС–5 и о необходимости разработки рекомендаций для внесения двух предложенных вариантов усиления отверстий моделей БГС–3 и БГС–5 в соответствующие своды правил (СП) или строительных норм (СН) и, таким образом, расширить ими круг вопросов практического применения.

12. В целом проведенные испытания показали необходимость и экономическую целесообразность проведенных экспериментальных работ по выявлению оптимальных способов подкрепления отверстий, в целях удовлетворения требованиям технологов по пропуску оборудования в пределах строительной высоты балок, снижения расхода стали на их подкрепление и уменьшение трудоемкости изготовления.

13. Наиболее экономически эффективными способами усиления отверстий, с точки зрения экономии металла, можно считать вариант принятый для балок БГС–4 и БГС–5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В конце 18 века гофрированные конструкции, так называемые переборки, начинают применяться в судостроении, а в конце 1920–х годов, после начала использования сварочных работ, находят широкое применение в строительной отрасли.

2. В нашей республике уже более 40 лет при строительстве зданий и сооружений применяют сварные двутавровые балки и колонны с гофрами треугольного очертания «БГС–Казахстан». Область применения металлических гофрированных конструкций на территории Республики Казахстан очень велика. Построено более 300 зданий и сооружений с использованием сварных двутавровых балок с гофрами треугольного очертания типа «БГС–Казахстан» и «Алма–Ата».

3. Основными факторами, влияющими на несущую способность балки с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями, являются: отверстия в бал-

ке, шаг отверстий в стенке балки, очертание отверстия, гибкость стенки, а также расположение центра отверстия относительно высоты стенки.

3. Исследование по влиянию отверстий на напряженно–деформированное состояние конструкции играет большую роль как с теоретической, так и с практической точки зрения. При выполнении отверстий в стенке балки происходит ослабление ее несущей способности, причем в случае действия помимо изгибающего момента еще и поперечной силы, снижает ее еще больше.

4. Вероятность потери устойчивости стенки в соответствии с европейской методикой расчета на сдвиг уменьшена, критическое напряжение равняется от 60 до 85% расчетного сопротивления, а в российской методике расчета 30–60%, с учетом одинаковых параметров гофров $\frac{f}{a}$, по методике расчета применяемого на территории нашей республики получено среднее значение 30-50%, для наиболее эффективных параметров гофров, что подтверждается полученными экспериментальными данными.

5. При классификации поперечного сечения с гофрированной стенкой, определялись границы, при достижении которых несущая способность поперечного сечения ограничивается потерей местной устойчивости. В условиях сжатия, если стенка классифицируется по классу 1, а полки имеют класс 1 или 2, то общее поперечное сечение классифицируется как сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой. А в условиях изгиба, если стенка классифицируется по классу 1, а полки имеют класс 1 или 2, то общее поперечное сечение классифицируется как сечение класса 1 с эффективной полкой и стенкой.

6. Для гофрированных стенок различной толщины при детальном сравнительном анализе полученных данных Sin балки и ГС Казахстан наиболее эффективными для повышения устойчивости являются следующие параметры балок ГС Казахстан со следующими параметрами гофров:

- для гофрированной стенки толщиной 2 мм – ГС Каз 280×45×2 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 3 мм – ГС Каз 140×45×3 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 4 мм – ГС Каз 480×80×4 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 5 мм – ГС Каз 480×80×5 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 6 мм – ГС Каз 480×80×6 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 8 мм – ГС Каз 480×80×8 мм;
- для гофрированной стенки толщиной 10 мм – ГС Каз 480×80×10 мм.

7. Выполненный дисперсионный анализ полученных приведенных моментов инерции $I_y^{пр}$ и приведенных моментов сопротивления $W_y^{пр}$ для гофрированных стенок синусоидального и треугольного очертания гофров, позволяет утверждать, что с переходом Республики Казахстан на европейские нормы проектирования Eurocode, а также с внедрением гармонизированной версии в нормы проектирования проектирование, методика, предложенная для расчета балок с гофрированной стенкой синусоидального очертания гофров (Sin балка), в некоторых случаях, может быть применена к балкам с гофрированной стенкой с треугольным очертанием гофров (ГС балка), также и наоборот.

8. Численное параметрическое исследование балки с треугольным очертанием гофра, включало в себя анализ 55 моделей балок, из которых 1 модель

балки без отверстий, 27 моделей с тремя отверстиями в стенке и 27 моделей с двумя отверстиями с диаметром $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$, расположенные с шагом между центрами отверстий $2d$, $3d$ и $4d$. Анализ работы моделей балок с тремя отверстиями под сосредоточенной нагрузкой, усиленных окаймлением и параллельными ребрами жесткости, показал эффективность размещения в гофрированной стенке отверстий с шагом отверстий $2d$ и с диаметром отверстий $0,25h_w$ и $0,5h_w$, а для двух отверстий, усиленных окаймлением и параллельными ребрами жесткости, эффективность размещения отверстий с шагом отверстий $2d$ и $3d$ и с диаметром отверстий $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$.

9. Наиболее эффективной толщиной окаймления и ребер жесткости для отверстий с диаметром $0,25h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 2 до 4 мм; для отверстий с диаметром $0,5h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 4 до 6 мм; для отверстия с диаметром $0,75h_w$ и шагом $2d$ является толщина от 6 до 8 мм.

10. Определено влияние площади окаймления на уменьшение прогиба. Так, эффективнее использование окаймления по площади равно площади отверстия.

11. Исследовано влияние расположения усиленных отверстий по высоте гофрированной стенки на прогиб балки. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным вариантом для расположения отверстий по высоте стенки балки является центральная часть стенки, но в случае необходимости смещения отверстия, эффективнее будет смещение их в сторону растянутого пояса балки с гофрированной стенкой.

12. По анализу результатов прогибов моделей с совершенствованными вариантами усиления отверстий обозначена эффективность использования совместного усиления отверстий окаймлением и утолщением стенки в области отверстий над усилением отверстия окаймлением совместно с ребрами жесткости. Дополнительное уменьшение прогиба было достигнуто при использовании окаймления с элементами с загиба внешней грани окаймления.

13. По проведенным испытаниям моделей балок с тонкими ($\lambda_w = 300$) гофрированными стенками, можно сделать выводы, что предельная экспериментальная нагрузка всегда была выше расчетной для всех типов балок с гофрированной стенкой, что говорит о высокой надежности всех элементов конструкций, за исключением модели балки БГС–2, стенка которой ослаблена двумя отверстиями без подкрепления.

14. Разница между компьютерными и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла составляет от 0,37 до 5,5% для всех исследованных моделей. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями прогибов в упругой стадии работы металла для модели БГС–1 составляет 1,5%.

15. В рамках данной работы были усовершенствованы существующие методы усиления отверстий в моделях балки БГС–3 и БГС–5, которые подтвердили свою эффективность, как с точки зрения деформативности, так и трудоемкости, так как изготовление модели БГС–3 менее трудоемко, по сравнению с другими вариантами, а несущая способность модели БГС–5 выше всех остальных моделей.

16. Выполненный дисперсионный анализ позволил сделать выводы о необходимости разработки рекомендаций для внесения двух предложенных вариантов усиления отверстий моделей БГС–3 и БГС–5 в соответствующие своды правил (СП) или строительных норм (СН) и, таким образом расширить ими круг вопросов практического проектирования.

17. На модели балок БГС–3 и БГС–5 были получены патенты на полезную модель, приведенные в Приложениях Г и Д.

18. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ТОО «Международная образовательная корпорации» при изучении таких дисциплин как: «Проектирование и расчет металлических конструкций», «Испытание сооружений», «Современные компьютерные расчеты» и «Технология возведения уникальных зданий», а также при разработке студентами дипломных и курсовых проектов. Предложенные методы усиления отверстий настоящей диссертационной работы, используются на предприятии ТОО «Институт Прокстальконструкция» (г. Алматы) при проектировании стальных несущих конструкций с гофрированной стенкой в промышленных и гражданских зданиях и сооружениях. Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании несущих металлических конструкций стадии КМ шифра 8.1 – Ф7038КМ здания выставочного центра Выставочного комплекса в г. Нур-Султан. В Приложении А приведена справка от 02 сентября 2019 г. №01 – 58 о практическом внедрении результатов данной диссертационной работы, а в Приложении Б приведены фотографии внедренных результатов диссертационной работы в производственный процесс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Брянцев А.А. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в здании производственного назначения // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 3(54). – С. 93–104.
- 2 Каталог легких несущих и ограждающих металлических конструкций, и комплектующих металлоизделий для промышленных зданий. – М., 1989. – Ч. 1. – 202 с.
- 3 «Алма–Ата». Производственный корпус (площадь 648 м²) с подвесным краном грузоподъемностью 3,2 т. Шифр 661–01С. Каталог легких несущих и ограждающих металлических конструкций, и комплектующих металлоизделий для промышленных зданий. – М., 1991. – С. 2–4.
- 4 Брянцев А.А., Хван К., Жиенбаева А. История развития гофрированных балок // Сборник научных трудов XVII Международной научно–практической конференции. – Переяслав–Хмельницкий, 2016. – Вып. 10(18). – С. 6–8.
- 5 Брянцев А.А. Замена прокатных конструкций покрытия производственного здания и металлических ферм на балки с гофрированной стенкой // Вестник Казахской головной архитектурно–строительной академии. – Алматы, 2017. – №3 (65). – С. 130–135.
- 6 Васильев, А.Л. Прочные судовые гофрированные переборки. – Л.: Судостроение, 1964. – 316 с.
- 7 Афанасьев В. Судовые переборки. – Л.: Котлин, 1898. – 271 с.
- 8 Переборки «Pierrottet’a» // «Кораблестроитель». –1927. –№ 7. – С. 55–56.
- 9 ЗАО «Гофросталь» Предприятие промышленного холдинга «Опытный завод Гидромонтаж» URL: <http://www.gofrostal.ru> 21.11.2017.
- 10 Институт Проектстальконструкция. URL: <http://www.psk-almaty.kz> 21.11.2017.
- 11 Ikeda S., Sakurada M. (2005) Development of hybrid prestressed concrete bridges with corrugated steel web construction // Proceedings of the 30th Conference on Our World In Concrete & Structures. – Singapore. – 2005; Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.cipremier.com/e107_files/downloads/Papers/100/30/100030003.pdf 26.10.2017.
- 12 Ezzeldin Yazeed Sayed–Ahmed. Composite Bridges Constructed With Corrugated Steel Web Box Girders (PDF Download Available), 2015. Доступно https://www.researchgate.net/publication/280609665_Composite_Bridges_Constructed_With_Corrugated_Steel_Web_Box_Girders 21.11. 2017.
- 13 Chen W.F., Duan L. Bridge engineering handbook. – CRC Press, USA, 1999. – 752 p.
- 14 Graceful Himi makes fitting gateway // Bridge Design & Engineering 2nd Quarter. – 2004. – Vol.10, № 35. – 14 p.
- 15 The world’s first extradosed bridge with corrugated steel webs. – DSI Info. – 2006. –№ 13. – 8 p.
- 16 Niwa J. World's first PC–steel composite cable–stayed bridge using corrugated steel plate webs for PC girders. Yahagigawa Bridge on the Second Tomei Expressway. Project Report. – Tokyo: Tokyo Institute of Technology. – 2005. – 6 p.

17 Miyauchi, H., Yasukawa, Y., Nakazono, A., Mori, T. and Cho, K.: Planning and Design of Ritto Bridge – Extradosed Bridge with Corrugated Steel Webs // Bridge and Foundation Engineering. –Kensetsu, 2003. –Vol.37, № 12. – P.9–18.

18 Nakazono, A., Fukuhara, H., Nishida, T. and Suda, T. Construction of Ritto Bridge on the New Meishin Expressway // Bridge and Foundation Engineering. – Kensetsu-Tosho, 2004. – Vol.38, № 10. – P. 5–11.

19 Muraio, M., Miyauchi, H., Mouri, T., Tanaka, K., Sagawa, N. and Nishimura, I.: Design and Construction of Shigaraki 7th Bridge and Tsukumigawa Bridge, Bridge and Foundation Engineering. – Kensetsu-Tosho, 2004. – Vol. 38, № 2. – P. 5–13.

20 Wang Y.L., Li M.H., Wan S., Zhang J.D. Analysis of the Closure Method of Cantilever Construction PC Box-Girder Bridge with Corrugated Steel Webs under Asymmetric Constraint // Applied Mechanics and Materials. 2012. – Vol.178-181– P. 2543–2548.

21 Лукин А.О., Суворов А.А. Пролетные строения мостов с гофрированными металлическими стенками // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – №2 (41). – С. 45–67.

22 Large bridges. M43 Motorway, Mora Ferenc Tisza bridge. URL: http://pontterv.hu/pontterv_html/m43_e.htm 21.11.2017.

23 Максимов Ю.С., Остриков Г.М., Ибраимов Н.Э. Строительные гофрированные конструкции. – Алматы, 2016. – 128 с.

24 Максимов Ю.С., Ващенко Г.А. Современные стальные сейсмостойкие конструкции уникальных большепролетных покрытий зданий Ледовой Арены в г. Алматы // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». –2015. – №5. – С. 53–58.

25 Брянцев А.А. Особенности применения и работы балок с гофрированными стенками // Сб. мат. Междунар. науч. –практ. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития строительства». – Алматы, 2017. – С. 128–132.

26 Огневой В.Г. Исследование работы стальных колонн одноэтажных промышленных зданий с тонкой гофрированной стенкой: автореф... канд. техн. наук. – Воронеж, 1994. – 18 с.

27 Wellstegträger productionsanlage sin beam machine: сайт Zeman Bauelemente Produktionsges. [http:// www.zebau.com/media/sin-beam-machine.pdf](http://www.zebau.com/media/sin-beam-machine.pdf) 25.11.2017.

28 Нежданов К.К. Повышение долговечности стальных подкрановых балок // Промышленное строительство. – №1, 1987. – С. 43–45.

29 Беляев В.Ф. Об оптимальной ориентации закрытых гофров в стенке стальной двутавровой балки // Промышленное строительство. – 1990. – №10. – С. 20–21.

30 Ольков Я.И., Степаненко А.Н., Ананченко В.И., Санников С.В. Теоретические и экспериментальные исследования балок с гофрированными стенками // Всесоюзная конференция по экспериментальным исследованиям инженерных сооружений. – М., 1975. – С. 159–171.

31 Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. – М., 1957. – 463 с.

32 Ольков Я.И., Степаненко А.Н., Санников С.В. Об одном направлении поисков рациональной формы тонкостенных металлических балок // Межвузов-

ский сборнике №2 «Повышение надежности и долговечности строительных конструкций». – 1972. – С. 10–17.

33 Зазов В. Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 486 с.

34 Кудрявцев В.А. Предельные состояния гофрированных пластин в конструкциях пролетных строений цельнометаллических транспортных галерей: дис. канд. техн. наук. – Ленинград, 1984. – 167 с.

35 Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем. Упругие рамы, фермы и комбинированные системы. – М.: Госстройиздат, 1949. – 376 с.

36 Кудрявцев В.А., Москалева В.Г. Экспериментальное исследование устойчивости пространственных коробчатых элементов с горизонтально-гофрированными стенками при действии преобладающего сдвига – В кн: Статика и динамика сложных строительных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. – Л.: ЛИСИ, 1982. – С. 92–94.

37 Степаненко А.Н. Прочность и устойчивость конструкций из двутавра с волнистой стенкой: дис... докт. техн. наук. – Хабаровск. 2001. – 234 с.

38 Степаненко А.Н. Экспериментальные исследования алюминиевых балок с волнистой стенкой // Строительная механика и строительные конструкции. – Хабаровск: ХПИ, 1971. – С. 133–142.

39 Степаненко А.Н. Исследование работы металлических балок с тонкими гофрированными стенками при статическом нагружении: дис... канд. техн. наук. – Свердловск, 1972. – 211 с.

40 Горнов В.Н. Новые тонкостенные конструкции // Проект стандарт. – 1937. – № 3. – С. 25–28.

41 Короткин Я.И., Постнов В.А., Сиверс Н.Л. Строительная механика корабля и теория упругости. – Л.: Судостроение, 1968. – 423 с.

42 Abbas H.H., V.G. Kim, Sause R., Unconventional high performance steel bridge girder systems. Advanced Technology for Large Structural Systems (ATLSS) Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, 2006. – P. 8.

43 Abbas, H.H. Analysis and design of corrugated web I-girders for bridges using high performance steel: Ph.D. dissertation // H.H. Abbas; Lehigh University. Bethlehem, 2003. – 425 p.

44 Abbas H.H., Sause, R., Driver, R.G. 2002. Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders. Proc. 2002 Annual Stability Conference, Seattle, Washington, 2002. – P. 361–387.

45 Elgaaly M., Hamilton, R.W., Seshadri, A. Shear strength of beams with corrugated webs // ASCE Journal of Structural Engineering. – 1996. – 122(4) – P. 390–398.

46 Kuchta K.R. Design of corrugated webs under patch load // Advanced Steel Construction. – 2007. – Vol. 3, №. 4. – P. 737–751.

47 Kuchta K.R. Wavy Corrugated Web Stiffness Influence on Plate Girders Flange Local Stability. Cracow University of Technology. – Poland, 2010. – P. 205–210.

48 Abu Hassan M. H., Al-Mattarneh H. M. A., Ibrahim A., Abdul Hamid H., Mohammed B. S. Effect of Web and Flange Thickness of Profiled Web Girder using LUSAS // International conference on construction and building technology. – 2008. – P. 515–528.

49 Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // Journal of Construction Steel Research. – 2002. – Vol. 58. – P. 1391 – 1406.

50 Khalid Y.A. Bending strength of corrugated web beams // ASEAN Journal on Science Technology for Development. – 2003. – Vol. 20, Issue 2. – P. 177 – 186.

51 Abdul Hamid H., Ibrahim A. and Abu Hassan M.H. Intermediately stiffened webbed welded plate girder // Proceeding 7th International Conference on Steel and Space Structures, Singapore, 2002. – P. 267 – 274.

52 Abdul Hamid H., Ibrahim A. and Abu Hassan M.H. Plate girder under shear load // Proceeding of the 5th Asia–Pacific Structural Engineering Conference, Johore Bahru, 2003. – P. 451 – 466.

53 Abdul Hamid H., Ibrahim A. and Abu Hassan M.H. Buckling of singly and doubly–webbed corrugated web girders under shear loading. Technical Post Graduate Symposium, University Malaya, Kuala Lumpur, 2003. – P. 627 – 629.

54 Крети́нин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок: дис... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 139 с.

55 Рыбкин И.С. Совершенствование конструктивных решений, методов моделирования и расчета гофрированных элементов: дис... канд. техн. наук. – М., 2008. – 195 с.

56 Kovesdi B., Dunai L. Determination of the patch loading resistance of girders with corrugated webs using nonlinear finite element analysis // Computers and Structures. – 2011. – № 89. – P. 2010–2019.

57 Leiva–Aravena L., Edlund B. Buckling of trapezoidally corrugated webs // ECCS Colloquium on Stability of Plates and Shells. Belgium: Ghent University. – 1987. – P. 107–116.

58 Kahonen A. Zur Einleitung von Einzellasten in I-Träger mit trapezformig profilierten Stegen. – Stahlbau, 1988. – № 57(8). – P. 250–258.

59 Егоров П.В. Исследование напряженно–деформируемого состояния стальных балок и колонн из двутавра с тонкой гофрированной стенкой: дис... канд. техн. наук. – Хабаровск, 2010. – 217 с.

60 Степаненко А.Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой. – Хабаровск: Изд. Хабаровского государственного технического университета. – 2001. – 175 с.

61 Кудрявцев С.В. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговым отверстием: дисс...канд. техн. наук. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 175 с.

62 Martins A.G., Fakury R.H., Pimenta R.J., Queiroz G., Rodrigues F.C. Moment resistance of composite steel and concrete connection in sinusoidal–web girders // Journal of Constructional Steel Research. – 2012. – № (76). – P. 112–120.

63 Martins AG. Study of the behavior of composite girders with sinusoidal–web. Ph.D. Thesis. Federal University of Minas Gerais, Brazil, 2008 (in Portuguese). <http://www.pos.dees.ufmg.br>. 01.10.2018.

64 Calenzani AFG. Procedure to determine the rotational stiffness of composite beams with sinusoidal–web profiles. Ph.D. Thesis. Federal University of Minas Gerais. – Brazil, 2008 (in Portuguese). <http://www.pos.dees.ufmg.br> 01.10.2018.

65 Pimenta RJ, Diniz SMC, Queiroz G, Fakury RH, Martins AG, Rodrigues FC. Reliabilitybased design recommendations for composite corrugated–web beams // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2012. – № 18. P. 185 – 93.

66 Adenilcia F.G. Calenzani, Ricardo H. Fakury and others. Rotational stiffness of continuous composite beams with sinusoidal–web profiles for lateral–torsional buckling // Journal of Constructional Steel Research. – 2012. – № 79. – P. 22 – 33.

67 Полтора́днeв А.С. Несущая способность и оптимизация стальных тонкостенных балок: дис... канд. техн. наук. – М.:, 2013. – 216 с.

68 Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.

69 Арже́мачев Г.А. Балки с волнистыми стенками// Промышленное строительство. – 1963. – №4 – С. 54 – 56.

70 Арже́мачев Г.А. Исследование сварных стальных балок с волнистыми стенками: автореферат дис... канд. техн. наук. – Новосибирск: НИСИ, 1969. – 16 с.

71 Остриков Г.М., Максимов Ю.С. Легкие стальные конструкции покрытий производственных зданий. Экспресс–информация. КазЦНТИС. – Алма–Ата, №1, 1987. – 41 с.

72 Остриков Г.М., Максимов Ю.С. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий. – Алма–Ата: Издательство «Казахстан», 1985. – 117 с.

73 Bryantsev A.A. Development of modular systems made of thin–walled and corrugated steel structures in the Kazakhstan // International independent scientific journal. –Kraków, 2019. – VOL. 1 – P. 7–12.

74 Максимов Ю.С., Ибраимов Н.Э. Новые конструктивные формы строительных металлоконструкций и их влияние на интенсификацию строительного производства // Тезисы докладов республиканской конференции «Интенсификация и повышение эффективности общественного производства на основе ускорения научно–технического прогресса». – Алма–Ата, 1987. – С. 13 – 14.

75 Ибраимов Н.Э и др. Достижения науки в производство // Монтажные и специальные работы в строительстве. –1984. – №7. – С. 15 – 19.

76 ТУ 640 РК 02495141–001–94 «Двутавры стальные сварные с поперечно–гофрированной стенкой. Технические условия».

77 ГОСТ 23118–2012 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия».

78 СНиП РК 5.04–18–2002 «Металлические конструкции. Правила производства и приемки работ».

79 Инструкция по изготовлению стальных сварных двутавровых профилей. – Астана, 2010. – С. 67.

80 Morkhade S., Baswaraj S., Nayak C. Comparative study of effect of web openings on the strength capacities of steel beam with trapezoidally corrugated web // Asian Journal of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 20. – P. 1089 – 1099.

81 Feng R., Zhan H., Meng S., Zhu J. Experiments on H-shaped high-strength steel beams with perforated web // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 172. – P. 1057 – 1072.

82 De'nan F., Hasan H., Nassir D. Kh., Osman M.H., Saad S. Finite element analysis for torsion behavior of flat web profile beam steel section with opening // Procedia Engineering. – 2015. – Vol.125, – P. 1129 – 1134.

83 Krishnan L., Dineshraj C.S., Prema S. Experimental Investigation of cold-formed steel section–flexural member with triangular web // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR–JMCE). – 2015. – Vol. 12. – P. 36 – 39.

84 Syerko E., Diskovsky A.A., Andrianov I.V., Comas–Cardona S., Binetruy C. Corrugated beams mechanical behavior modeling by the homogenization method // International Journal of Solids and Structures. – 2013. – № 50 (6). – P. 928 – 936.

85 De'nan F., Hasan H., Choong K. Experimental study on lateral torsional buckling of triangular web profile steel section // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 802. – P. 178 – 183.

86 Pasnur P., Kumbhare M. Study of beam with plain web, trapezoidal corrugated web, and triangular corrugated web // Journal of Advances and Scholarly Researches in Allied Education. – 2018. – Vol. XV, № 2. – P. 630 – 634.

87 De'nan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Finite element analysis of the loading position effects to the bending behaviour of triangular web profile steel section // Global Civil Engineering Conference. – 2019. – Vol. 9. – P. 439 – 449.

88 Divahar R., Joanna P.S. Lateral buckling of cold formed steel beam with trapezoidal corrugated web // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – 2014. – Vol. 5. – P. 217 – 225.

89 Wang Zh., Wang Q., Liu Y., Sun M. Fatigue behaviour of welded joints assembled by longitudinal corrugated plates // Journal of Central South University. – 2015. – Vol. 22. – P. 2752 – 2760.

90 Wang S., He J., Liu Y. Shear behavior of steel I–flange with stiffened corrugated web, Part I: Experimental study // Thin–Walled Structures. – 2019. – Vol. 140. – P. 248 – 262.

91 Manju T., Arundhavapriya E., Bharath K.B. Study on behavior of corrugated webs in cold formed steel sections with varying thickness. Asian journal of civil engineering (BHRC). – 2016. – Vol. 17, № 7. – P. 1025 – 1033.

92 Baby A., Jacob K. A parametric study on the effect of multi–corrugated web profile on the performance of steel beam section. International Research Journal of Advanced Engineering and Science. – 2017. – Vol. 2. – P. 210 – 214.

93 Kiymaz G., Coskun E., Cosgun C., Seckin E. Transverse load carrying capacity of sinusoidal corrugated steel web beams with web openings. Steel and Composite Structures. – 2010. – № 10 (1). – P. 69 – 85.

94 De'nan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken Ch.W. Nonlinear Analysis of Triangular Web Profile Steel Section Under Bending Behaviour // Global Civil Engineering Conference. – 2017. – Vol. 9 – P. 463 – 472.

95 Jager B., Dunai L., Kövesdi B. Girders with trapezoidally corrugated webs subjected by combination of bending, shear and path loading // *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Vol. 96. – P. 227 – 239.

96 Sarah A.P., Jacob P.A. A review of optimization of plate girders with corrugated webs // *International journal of Innovative Research in Science and Engineering*. – 2016. – № 2. – P. 63 – 71.

97 Cheng J. Summary of corrugated web H-shaped steel beam joints // *International Journal of Science*. – 2016. – Vol. 3, № 4.– P. 136 – 140.

98 Hajsadeghi M., Zirakian T., Keyhani A., Naderi R., Shahmohammadi A. Energy dissipation characteristics of steel coupling beams with corrugated webs // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2014. – № 101. – P. 124 – 132.

99 Ольков Я. И., Полтораднев А. С. Напряженно-деформированные и предельные состояния тонкостенных балок с определением оптимальных их параметров // *Сб. докл. Международного конгресса: СПбГА-СУ*. – СПб. – 2012. – С.96-101.

100 Полтораднев А.С. Тонкостенные металлические балки. Особенности конструктивного решения и расчёта // *Сб. тр. науч. –практ. конф. «Наука МИИТ – транспорту – 2009»*. – М., 2009. – С. 30–31.

101 РДС РК 5.04–24–2006. Сортамент сварных двутавровых профилей обычного типа и с гофрированными стенками, соответствующих по прочностным характеристикам прокатным. – Астана, 2007. – 22 с.

102 Проектирование металлических конструкций: специальный курс / Под ред. В.В. Бирюлева. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.

103 Металлические конструкции. Справочник проектировщика. В 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений // Под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: АСВ, 1998. – 512 с.

104. Металлические конструкции: учебник для студентов высших учебных заведений/ Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др. – М.: Академия, 2006. – 688 с.

105 Металлические конструкции. В 3–х т. Т. 1. Элементы конструкций. Под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 2004. – 551 с.

106 Патент 91583 Российская Федерация. Балка с переменногофрированной стенкой/ Рыбкин И. С. опубл. 20.02.2010.

107 Патент 111172 Российская Федерация. Металлическая балка с мультигофрированной стенкой / Рыбкин И. С. опубл. 10.12.2011.

108 Патент 2409728 Российская Федерация. Балка композиционной структуры с гофрированными элементами / Рыбкин И. С. опубл. 10.01.2011.

109 Патент 2492301 Российская Федерация. Балка с гофрированной асимметричным профилем стенкой / Рыбкин И. С. опубл. 10.09.2013.

110 Патент 1086090 СССР. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий / Остриков Г.М., Максимов Ю.С. опубл. 10.02.1982.

111 Патент 1388526 СССР. Стропильные и подстропильные балки с гофрированной стенкой / Максимов Ю.С., Остриков Г.М., опубл. 15.04.1986 г. Бюл. №14.

112 Patent US 2004/0262914. Corrugated web hole reinforcement / David S. Nansen., Paul S.Gregg, R.Matsen, Pub.date. 30.12.2004.

- 113 Chung K.F. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings / K.F. Chung, T.C.H. Liu, A.C.H. Ko // Journal of constructional steel research. – 2001. – Vol. 57. – P. 467–490.
- 114 Chung K.F. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment–shear interaction curve // Journal of constructional steel research. – 2003. – Vol. 59. – P. 1177–1200.
- 115 Darwin D. Design of steel and composite beams with web openings / D.D. Darwin. – American institute of steel construction. – USA, 1990. – 65 p.
- 116 Hagen N.C. Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part 1: Modeling and simulations // Journal of constructional steel research. – 2009. Vol. 65. – P. 142–150.
- 117 Hagen N.C. Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part 2: Design guidelines / N.C. Hagen, P.K. Larsen // Journal of constructional steel research. – 2009. – Vol. 65. – P. 151–158.
- 118 Shanmugan, N.E. Finite element modeling of plate girders with web openings/ N.E. Shanmugan, V.T. Lian, V. Thevendran // Thin-walled structures. – 2002. – Vol. 40. – P. 443–464.
- 119 Salem A.H. Elastic buckling of corrugated webs with openings // Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering. – Egypt, 2007. – 13 p.
- 120 Salem A.H. Elastic Buckling of corrugated webs sub-panel openings // Eleventh International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering. – Egypt, 2005. – 10 p.
- 121 Romeijn A. Basic parametric study on corrugated web girders with cut outs // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – № 65. – P. 395–407.
- 122 Ibrahim H., Behaviour of Corrugated Web Beams with Openings // Scientific Bulletin, Faculty of Eng. – 1999. – Vol. 34 (4). – P 151–180.
- 123 Бойцов Г.В., Палий М.О., Постнов В.А., Чувиковский В.С. Справочник по строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1982. – 464 с.
- 124 Tuzi Z., Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research. – 1928. – № 156.
- 125 Кокер Э. Фаилон Л. Оптический метод исследования напряжений. – Л., 1936. – 644 с.
- 126 СНиП РК 5.04–23–2002 «Стальные конструкции. Нормы проектирования. – Астана, 2003. – 118 с.
- 127 Максимов Ю.С., Остриков Г.М., Долинский В.В. Устойчивость гофрированных стенок двутавровых балок // Строительная механика и расчет сооружений. – 1985. – № 6. – С. 43–45.
- 128 Рекомендации по конструированию и расчету стальных двутавровых ригелей с гофрированными стенками. КазЦНТИС. – Алма-Ата, 1981. – 14 с.
- 129 Брянецев А.А. Особенности методов расчета гофрированных двутавровых балок // Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии. – Алматы, 2018. – № 4. – С. 127–137.
- 130 СН РК 5.04–07–2004 «Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий (в развитие СНиП РК 2.03–04–2004), часть 2». – Астана, 2005. – 46 с.

- 131 Барановская С.Г. Прочность и устойчивость гофрированной стенки стальной двутавровой балки: автореф. дис... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1990. – 21 с.
- 132 Бирюлев В.В. и др. Местное напряженное состояние гофрированной стенки двутавровой балки при локальной нагрузке // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1989. № 11.– С.13–15.
- 133 СН РК EN 1993–1–5:2006 «Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1–5. Элементы конструкций из листовой стали». – 2011. – 57 с.
- 134 СН РК EN 1993–1–5:2005 «Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий». – 2011. – 83 с.
- 135 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General structural rules, EN 1993–1–1: 2005. European Committee for Standardization: Brussels. – 2005. – 93 с.
- 136 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–5: Plated structural elements, EN 1993–1–5: 2005. European Committee for Standardization: Brussels. – 2006. – 55 с.
- 137 СНиП II–23–81* Стальные конструкции. Актуализированная редакция: СП 16.13330.2011. – М.: 2011. – 117 с.
- 138 Общие правила проектирования стальных конструкций: СП 53–102–2004. – М.: ЦНИИСК, 2005. – 138 с.
139. Карпиловский В., Криксунов Э., Маляренко А., Перельмутер А., Перельмутер. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++, СКАД–СОФТ. – М.: Фиалко С, 2016. – 848 с.
- 140 Брянцев А.А. Теоретические исследования по определению экономической эффективности гофрированных стенок с различным очертанием гофр и их параметров // Сборник материалов Международной научно–практической конференции. – Алматы, 2018. – С.106–120.
- 141 Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1967. – 405 с.
- 142 Брянцев А.А. Численное исследование гофрированной стенки синусоидального и треугольного сечения гофр. Вестник Национальной инженерной академии РК. – Алматы, 2019. – №3. – С.48–54.
- 143 ГОСТ 380–2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – 2008. – 15 с.
- 144 СН РК 5.04–08–2004 Пособие по проектированию стальных конструкций. – 2005. – 144 с.
- 145 Bryantsev A.A., Absimetov V.E., Lalin V.V. The effect of perforations on the deformability of welded beam with corrugated webs // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – № 87(3). – P. 18 – 34.
- 146 Bryantsev A.A. Analysis of operation of a welded I–beam with corrugated webs of a triangular shape profile weakened by technological openings // Вестник Казахской головной архитектурно–строительной академии. – Алматы, 2019. – №1. – С.112–119.
- 147 Kudryavtsev S.V. Transverse load carrying capacity of steel triangularly corrugated web beam with opening // MATEC Web of Conferences. – 2019. – № 279, 02004. – 6 p.

148 Kudryavtsev S.V. Influence of web openings on bearing capacity of triangularly corrugated web beam // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 365. – 9 p.

149 G. Kıymaz, E. Coskun, C. Cosgun and E. Seckin Transverse load carrying capacity of sinusoidal corrugated steel web beams with web openings // Steel and Composite Structures. – 2010. – Vol. 10, № 1. – P.69–85.

150 Брянецев А.А. Исследование усиления технологических отверстий сварной двутавровой балки с гофрированными стенками треугольного очертания профиля // Современные тренды в Архитектуре и строительстве: энергоэффективность, энергосбережение, BIM технологии, проблемы городской среды. – Алматы, 2019. – С. 33–43.

151 Брянецев А.А. Натурные испытания сварных гофрированных балок с круглыми отверстиями // Вестник КазНТУ. – Алматы, 2019. – № 5. – С. 261–268.

152 Брянецев А.А., Абсиметов В.Э. Этапы планирования проведения испытания балок с гофрированной стенкой ослабленных технологическими отверстиями. Сборник докладов Международной научно–практической конференции (к 165–летию со дня рождения В.Г. Шухова). – Белгород, 2018. – С. 24–42.

153 Bryantsev A.A., Absimetov V.E. Laboratory tests of welded corrugated beams with perforations// Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of EECSE 2019. Energy, Environmental and Construction Engineering. – Saint Petersburg, 2019. – 12 с.

154 Брянецев А.А., Абсиметов В.Э. Сравнительный анализ результатов теоретических и компьютерных и расчетов сварной гофрированной балки с отверстиями // Вестник КазАТК. – Алматы, 2019. – № 4. – С. 24–32.

155. Брянецев А.А. Однофакторный эксперимент без ограничения на рандомизацию // Вестник Казахской головной архитектурно–строительной академии. – Алматы, 2019. – № 3. – С. 158–166.

156 Патент 4318 Республика Казахстан, Двутавровая балка с усиленными отверстиями / Брянецев А.А. – № 2019/0422.2 опубл. 18.09.2019

157 Патент 4540 Республика Казахстан, Двутавровая балка с усиленными отверстиями / Брянецев А.А. – № 2019/0774.2 опубл. 11.12.2019

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационной работы в производственный процесс

«БОЛАТКОНСТРУКЦИЯЖОБАСЫ
ИНСТИТУТЫ» Ж Ш С
(лицензия ГСЛ №000020 1 категория)



«ИНСТИТУТ ПРОЕКТСТАЛЬ-
КОНСТРУКЦИЯ» Т О О
(лицензия ГСЛ №000020 1 категория)

050057, Алматы каласы, а\я 11, Жандосов кошесі, 2; те-
лефон (727)- 3922257; телефон \ факс 3922263;
ЖҮК № KZ628 560 000 000 003 436
в АО АКФ «БанкЦентрКредит»,
РНН 600400023032, БИН 931 140 000 247, КБе 17
E-mail: PSK06alm@gmail.com WWW.PSK-almaty.kz

050057, г. Алматы, а\я 11, ул. Джандосова, 2;
телефон (727)- 3922257; телефон \ факс 3922263;
ИИК № KZ628 560 000 000 003 436
в АО АГФ «БанкЦентрКредит»,
РНН 600400023032, БИН 931 140 000 247, КБе17
E-mail: PSK06alm@gmail.com WWW.PSK-almaty.kz

№ 01 –58 от 02 сентября 2019 г.
На № _____ от _____ 201.. г.

СПРАВКА

Настоящая справка выдана докторанту Брянцеву А.А. в подтверждении того, что разработанная им в диссертационном исследовании методика выбора диаметра, шага и метода подкрепления круглых отверстий в сварной гофрированной двутавровой балке используется при проектировании стальных несущих конструкций с гофрированной стенкой в гражданских и промышленных зданиях и сооружений.

Результаты диссертационной работы Брянцева А.А., так же как и данные из статьи «Влияние отверстий на деформативность стенки сварной гофрированной балки» опубликованные им в Инженерно-строительном журнале, 2019. № 3(87). С. 18–34 также были использованы при проектировании несущих металлических конструкций стадии КМ шифра 8.1-Ф7038-КМ здания Выставочного центра Выставочного комплекса в г. Нур-Султан.

Справка выдана для предоставления в Ученый совет по месту защиты диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D0722900-Строительство.

Заместитель директора
по техническим вопросам



Ващенко Г.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Фотографии внедренных результатов диссертационной работы в производственный процесс



Рисунок Б.1 – Выставочный комплекс в г. Нур–Султан, 2019 г.



Рисунок Б.2 – Сварная двутавровая балка
с гофрированной стенкой с тремя отверстиями

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

«ХАЛЫКАРАЛЫҚ БІЛІМ БЕРУ
КОРПОРАЦИЯСЫ» ЖШС
Қазақстан республикасы,
050043, Алматы қаласы, Рысқұлбеков көшесі, 28 үй
Тел.: (727) 220 80 64, 220 80 63, 220 80 76, 309 62 41
Факс: (727) 309 61 53, 226 77 99
Website: www.mok.kz
E-mail: info@mok.kz



ТОО «МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
КОРПОРАЦИЯ»
Республика Казахстан
050043, город Алматы, ул. Рысқұлбекова, 28
Тел.: (727) 220 80 64, 220 80 63, 220 80 76, 309 62 41
Факс: (727) 309 61 53, 226 77 99
Website: www.mok.kz
E-mail: info@mok.kz

LIMITED LIABILITY PARTNERSHIP
«INTERNATIONAL EDUCATIONAL CORPORATION»

Almaty 050043, Republic of Kazakhstan, Ryskulbekov street, 28, Tel: (727) 220 80 64, 220 80 63, 220 80 76, 309 62 41, Fax: (727) 309 61 53, 226 77 99, Website: www.mok.kz, E-mail: info@mok.kz

10.03.2019 № 10-03/696
(күн) (нөмірі)

(кіріс құжаттың күні мен нөміріне сілтеме)



УТВЕРЖДАЮ

ХБ Ректор МОК

Е.Т. Бесимбаев

2019 г.

АКТ

о внедрении материалов диссертационной работы Брянцева А.А. «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ГОФРИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ, ОСЛАБЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ»

в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, первый проректор, кандидат архитектуры, ассоциированный профессор Амандыкова Д.А. и декан факультета общего строительства, кандидат технических наук, ассоциированный профессор Имамбаева Р.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Брянцева А.А. на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D072900 – «Строительство» внедрены и используются в лекционных курсах, практических занятиях и лабораторных работах по следующим специальным дисциплинам:

- «Проектирование и расчет металлических конструкций – 1,2»;
- «Испытание сооружений»;
- «Современные компьютерные расчеты»;
- «Технология возведения уникальных зданий».

Также при выполнении научно - исследовательской работы студентов и в выпускных квалификационных работах по специальности 5B072900 – «Строительство».

Первый проректор

Д.А. Амандыкова

Декан

Р.С. Имамбаева

000077

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на полезную модель (Балка БГС–3)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 4318

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2019/0422.2

(22) 02.05.2019

Қазақстан Республикасы Пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan: 18.09.2019

(54) Күшейтілген тесіктері бар гофрленген қос таврлы арқасы
Двутаповая гофрированная балка с усиленными отверстиями
H-shaped corrugated beam with reinforced perforations

(73) Брянцев Александр Александрович (KZ)
Bryantsev Aleksandr Aleksandrovich (KZ)

(72) Брянцев Александр Александрович (KZ) Bryantsev Aleksandr Aleksandrovich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed by EDS

Е. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент на полезную модель (Балка БГС-5)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 4540

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2019/0774.2

(22) 05.09.2019

Қазақстан Республикасы Пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan: 11.12.2019

(54) Күшейтілген тесіктері бар гофрленген қос таврлы арқалық
Двухтавровая гофрированная балка с усиленными отверстиями
H-shaped corrugated beam with reinforced perforations

(73) Брянецев Александр Александрович (KZ)
Bryantsev Alexandr Alexandrovich (KZ)

(72) Брянецев Александр Александрович (KZ) Bryantsev Alexandr Alexandrovich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed by EDS

Е. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РІП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Данные для определения наиболее эффективных форм и параметров гофров

В таблицах Е.1 – Е.7 приведены данные геометрических характеристик гофр различного очертания и параметров, полученные при помощи программы Тонус на базе программы Scad, а в таблицах Е.8 – Е.14 данные характеристики внутренних сечений гофров различного очертания и параметров.

Таблица Е.1 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 2 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Австрия 155×40×2/30	ГС Швеция 75×57.6×2/30	ГС Каз. 155×40×2/30	ГС Каз. 80×20×2/5· t_w	ГС Каз. 140×25×2/5· t_w	ГС Каз. 200×30×2/5· t_w	ГС Каз. 280×45×2 /30
Длина полуволны гофра L_r , мм	0	77.5	187.5	77.5	40	70	100	140
Высота волны гофра f_r , мм	0	40	57.6	40	20	25	30	45
Радиус скругления r , мм	0	30	30	30	$5 \cdot t_w$	$5 \cdot t_w$	$5 \cdot t_w$	30
Ширина панели гофра b_w , мм	0	87.2	196.1	87.2	44.7	74.3	104.4	147.1
Толщина стенки t_w , мм	2	2	2	2	2	2	2	2
Гибкость панели стенки h_w / t_w	0	43.6	98.1	43.6	22.4	37.2	52.2	73.5
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	130	130	130	130	130	130	130
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	110	110	110	110	110	110	110
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	654	1471	654	335	557	783	1103
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	825	825	825	825	825	825	825
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	19623	44133	19623	10062	16724	23491	33087
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	24750	24750	24750	24750	24750	24750	24750

Таблица Е.2 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 3 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Австрия 155×43×3/ 30	ГС Швеция 375×57.6×3/ 30	ГС Каз. 155×43 ×3/30	ГС Каз. 155×43 ×3/15	ГС Каз. 155×43.4 ×3/30	ГС Каз. 140×45× 3/5· t_w	ГС Каз. 80×20×3/ 5· t_w	ГС Каз. 140×25 ×3/5· t_w	ГС Каз. 160×50 ×3/5· t_w	ГС Каз. 200×30 ×3/5· t_w	ГС Каз. 280×4 5×3/30	ГС Каз. 360×60 ×3/30
Длина полуволны гофра L_r , мм	0	77.5	187.5	77.5	77.5	77.5	70	40	70	80	100	140	180
Высота волны гофра f_r , мм	0	43	58.6	43	43	43	45	20	25	50	30	45	60
Радиус скругления r , мм	0	30	30	30	15	30	15	5· t_w	5· t_w	5· t_w	5· t_w	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	0	88.6	196.4	88.6	88.6	88.6	83.2	44.7	74.3	94.3	104.4	147.1	189.7
Толщина стенки t_w , мм	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Гибкость панели стенки h_w/t_w	0	29.5	65.5	29.5	29.5	29.5	27.7	14.9	24.8	31.4	34.8	49.0	63.2
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	665	1473	665	665	665	624	335	557	708	783	1103	1423
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238	1238
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	19942	44200	19942	19942	19942	18724	10062	16724	21226	23491	33087	42691
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125	37125

Таблица Е.3 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 4 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Ав-стрия 155×46×4/3 0	ГС Шве-ция 375×57.6× 4/30	ГС Каз. 80×20× 4/5·t _w	ГС Каз. 140×25 ×4/5·t _w	ГС Каз. 160×50× 4/5·t _w	ГС Каз. 200×30× 4/5·t _w	ГС Каз. 280×45× 4/30	ГС Каз. 360×60 ×4/30	ГС Каз. 420×70 ×4/30	ГС Каз. 480×70 ×4/30	ГС Каз. 480×80 ×4/30	ГС Каз. 520×80 ×4/30
Длина полуволны гофра L _r , мм	0	77.5	187.5	40	70	80	100	140	180	210	240	240	260
Высота волны гофра f _r , мм	0	46	58.6	20	25	50	30	45	60	70	70	80	80
Радиус скругления r, мм	0	30	30	5·t _w	5·t _w	5·t _w	5·t _w	30	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b _w , мм	0	90.1	196.4	44.7	74.3	94.3	104.4	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0	272.0
Толщина стенки t _w , мм	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Гибкость панели стенки h _w /t _w	0	22.5	49.1	11.2	18.6	23.6	26.1	36.8	47.4	55.3	62.5	63.2	68.0
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна 65 × t _w , мм	0	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна 55 × t _w , мм	0	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна h _w = 7,5 × b _w , мм	0	676	1473	335	557	708	783	1103	1423	1660	1875	1897	2040
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна h _w = 7,5 × b _w , мм	0	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
Предельная длина балки для Ст3 равна 30 × h _w , мм	0	20278	44200	10062	16724	21226	23491	33087	42691	49806	56250	56921	61207
Предельная длина балки для 09Г2С равна 30 × h _w , мм	0	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500	49500

Таблица Е.4 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 5 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×5/30	ГС Каз. 60×60×5/30	ГС Каз. 420×70×5/30	ГС Каз. 480×70×5/30	ГС Каз. 480×80×5/30	ГС Каз. 520×80×5/30
Длина полуволны гофра L_r , мм	0	140	180	210	240	240	260
Высота волны гофра f_r , мм	0	45	60	70	70	80	80
Радиус скругления r , мм		30	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	0	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0	272.0
Толщина стенки t_w , мм	5	5	5	5	5	5	5
Гибкость панели стенки h_w/t_w	0	29.4	37.9	44.3	50.0	50.6	54.4
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	325	325	325	325	325	325
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	275	275	275	275	275	275
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	1103	1423	1660	1875	1897	2040
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	2063	2063	2063	2063	2063	2063
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	33087	42691	49806	56250	56921	61207
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	61875	61875	61875	61875	61875	61875

Таблица Е.5 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 6 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×6/30	ГС Каз. 360×60×6/30	ГС Каз. 420×70×6/30	ГС Каз. 480×70×6/30	ГС Каз. 480×80×6/30	ГС Каз. 520×80×6/30
Длина полуволны гофра L_r , мм	0	140	180	210	240	240	260
Высота волны гофра f_r , мм	0	45	60	70	70	80	80
Радиус скругления r , мм		30	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	0	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0	272.0
Толщина стенки t_w , мм	6	6	6	6	6	6	6
Гибкость панели стенки h_w/t_w	0	24.5	31.6	36.9	41.7	42.2	45.3
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	390	390	390	390	390	390
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	330	330	330	330	330	330
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	1103	1423	1660	1875	1897	2040
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	2475	2475	2475	2475	2475	2475
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	33087	42691	49806	56250	56921	61207
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	74250	74250	74250	74250	74250	74250

Таблица Е.6 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 8 мм

№ п/п	Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×8/ 30	ГС Каз. 360×60×8/ 30	ГС Каз. 420×70×8/ 30	ГС Каз. 480×70×8/ 30	ГС Каз. 480×80×8/ 30	ГС Каз. 520×80×8/ 30
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Длина полуволны гофра L_r , мм	0	140	180	210	240	240	260
2	Высота волны гофра f_r , мм	0	45	60	70	70	80	80
3	Радиус скругления r , мм		30	30	30	30	30	30
4	Ширина панели гофра b_w , мм	0	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0	272.0
5	Толщина стенки t_w , мм	8	6	6	6	6	6	6
6	Гибкость панели стенки h_w/t_w	0	24.5	31.6	36.9	41.7	42.2	45.3
7	Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	390	390	390	390	390	390
8	Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	330	330	330	330	330	330
9	Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	1103	1423	1660	1875	1897	2040
10	Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	2475	2475	2475	2475	2475	2475
11	Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	33087	42691	49806	56250	56921	61207
12	Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	74250	74250	74250	74250	74250	74250

Таблица Е.7 – Сравнение геометрических характеристик стенок толщиной 10 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×10/ 30	ГС Каз. 360×60×10/ 30	ГС Каз. 420×70×10/ 30	ГС Каз. 480×70× 10/30	ГС Каз. 480×80×10/ 30	ГС Каз. 520×80×10/ 30
Длина полуволны гофра L_r , мм	0	140	180	210	240	240	260
Высота волны гофра f_r , мм	0	45	60	70	70	80	80
Радиус скругления r , мм		30	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	0	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0	272.0
Толщина стенки t_w , мм	10	10	10	10	10	10	10
Гибкость панели стенки h_w/t_w	0	14.7	19.0	22.1	25.0	25.3	27.2
Предельная ширина панели гофра для Ст3 равна $65 \times t_w$, мм	0	650	650	650	650	650	650
Предельная ширина панели гофра для 09Г2С равна $55 \times t_w$, мм	0	550	550	550	550	550	550
Предельная высота панели гофра для Ст3 равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	1103	1423	1660	1875	1897	2040
Предельная высота панели гофра для 09Г2С равна $h_w = 7,5 \times b_w$, мм	0	4125	4125	4125	4125	4125	4125
Предельная длина балки для Ст3 равна $30 \times h_w$, мм	0	33087	42691	49806	56250	56921	61207
Предельная длина балки для 09Г2С равна $30 \times h_w$, мм	0	123750	123750	123750	123750	123750	123750

Таблица Е.8 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 2 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Австрия 155×40× 2/30	ГС Шве- ция 375×57.6× 2/30	ГС Каз. 155×40× 2/30	ГС Каз. 80×20× 2/5·t _w	ГС Каз. 140×25× 2/5·t _w	ГС Каз. 200×30× 2/5·t _w	ГС Каз. 280×45× 2/30
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	155	375	155	80	140	200	280
Площадь поперечного сечения, см ²	2	3.42	8.08	3.53	1.76	2.98	4.15	5.89
Длина гофрированной стенки, мм	0	162.6	404.15	176.35	87.85	149.1	207.7	294.6
Момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴	0.01	5.93	40.07	5.92	0.57	1.57	2.75	10.38
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴ / 1см ² площади	0.005	1.734	4.959	1.677	0.324	0.527	0.663	1.762
Радиус инерции относительно центральной оси Y ₁ , см	0.06	1.32	2.23	1.3	0.57	0.73	0.81	1.33
Минимальный момент сопротивления относительно оси V, см ³	0.07	1.3	4.61	1.73	0.22	0.82	1.26	3.23

Продолжение таблицы Е.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V см ³ / 1см ² площади	0.035	0.380	0.571	0.490	0.125	0.275	0.304	0.548
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	0.637	220.881	631.740	213.64	41.257	67.114	286.96	84.414
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	4.46	48.42	72.68	62.43	15.92	35.05	75.09	38.68
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		16.6	23.4	16.6	9.5	11.0	18.6	11.8
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.173	0.169	0.179	0.173	0.167	0.186	0.163
Процентное отношение по расходу стали к Sin балке		100%	97.7%	105.7%	99.7%	96.5%	107.6%	94.0%

Таблица Е.9 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 3 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Австрия 155×43×3/30	ГС Швеция 375×57.6×3/30	ГС Каз. 155×43×3/30	ГС Каз. 155×43×3/15	ГС Каз. 155×43.4×3/30	ГС Каз. 140×45.4×3/5·t _w	ГС Каз. 80×20×3/5·t _w	ГС Каз. 140×25×3/5·t _w	ГС Каз. 160×50×3/5·t _w	ГС Каз. 200×30×3/5·t _w	ГС Каз. 280×45×3/30	ГС Каз. 360×60×3/30
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	155	375	155	155	155	140	80	140	160	200	280	360
Площадь поперечного сечения, см ²	3.00	5.27	12.11	5.29	5.28	5.37	4.40	2.61	5.89	5.72	6.21	8.80	11.34
Длина гофрированной стенки, мм	0.00	175.75	403.60	176.32	176.12	178.89	292.50	86.95	147.20	190.65	207.05	292.40	378.14
Момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴	0.02	9.60	60.09	8.83	8.27	10.06	13.00	0.84	2.15	13.64	3.87	14.53	33.31
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴ / 1 см ² площади	0.007	1.822	4.962	1.670	1.566	1.875	2.955	0.322	0.365	2.385	0.623	1.651	2.936
Радиус инерции относительно центральной оси Y ₁ , см	0.09	1.35	2.23	1.292	1.252	1.369	1.2	0.57	0.7	1.54	0.79	1.28	1.714

Продолжение таблицы Е.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см^3	0.15	2.02	6.82	1.96	1.938	2.033	3.1	0.36	1.19	3.38	1.76	4.53	5.973
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V $\text{см}^3 / 1 \text{ см}^2$ площади	0.050	0.383	0.563	0.371	0.367	0.379	0.705	0.138	0.202	0.591	0.283	0.515	0.527
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1 \text{ кг}$ массы стали гофра	0.85	232.06	632.10	212.71	199.53	238.80	376.38	41.00	46.50	303.77	79.39	210.34	374.04
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1 \text{ кг}$ массы стали гофра	6.37	48.83	71.74	47.20	46.78	48.25	89.75	17.57	25.74	75.28	36.10	65.58	67.07
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		19.5	26.8	19.0	18.6	19.8	22.3	10.8	12.3	21.7	13.2	18.4	22.3
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.267	0.254	0.268	0.267	0.272	0.247	0.256	0.330	0.281	0.244	0.247	0.247

Продолжение таблицы Е.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Процентное отношение по расходу стали к Sin балке		100%	95.0%	100.4%	100.2%	101.8%	96.0%	92.9%	105.1%	91.3%	92.4%	92.7%	100%
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 140×25×3		107.7%	102.3%	108.1%	107.9%	109.7%	103.3%	100.0%	113.2%	98.3%	99.5%	99.8%	107.7%

Таблица Е.10 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 4 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Син Австрия 155×46×4/30	ГС Швеция 375×57.6×4/30	ГС Каз. 80×20×4/5·tw	ГС Каз. 140×25×4/5·tw	ГС Каз. 160×50×4/5·tw	ГС Каз. 200×30×4/5·tw	ГС Каз. 280×45×4/30	ГС Каз. 360×60×4/30	ГС Каз. 420×70×4/30	ГС Каз. 480×70×4/30	ГС Каз. 480×80×4/30	ГС Каз. 520×80×4/30
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	155	375	80	140	160	200	280	360	420	480	480	520
Площадь поперечного сечения, см ²	4.00	7.00	16.12	3.45	5.87	7.46	8.29	11.71	15.10	17.60	19.93	20.20	21.67
Длина гофрированной стенки, мм	0.00	174.90	403.10	86.30	145.75	186.60	207.15	292.65	377.53	441.00	498.18	504.00	541.78
Момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴	0.05	13.26	80.12	1.11	2.81	16.11	5.54	18.66	42.877	68.8	76.63	103.3	108.496

Продолжение таблицы Е.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1 \text{ см}^2$ площади	0.013	1.894	4.970	0.322	0.479	2.160	0.668	1.594	2.839	3.909	3.846	5.114	5.007
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	0.12	1.38	2.23	0.57	0.69	1.47	0.82	1.26	1.685	2	1.961	2.3	2.238
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см^3	0.27	2.35	8.98	0.47	1.5	4.09	2.57	5.83	7.718	10.7	12.041	14.2	15.084
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V $\text{см}^3 / 1 \text{ см}^2$ площади	0.068	0.336	0.557	0.136	0.256	0.548	0.310	0.498	0.511	0.608	0.604	0.703	0.696
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1 \text{ кг}$ массы стали гофра	1.59	241.31	633.15	40.99	60.98	275.10	85.13	202.99	361.70	497.97	489.88	651.45	637.77
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1 \text{ кг}$ массы стали гофра	8.60	42.77	70.96	17.35	32.55	69.84	39.49	63.42	65.11	77.45	76.98	89.55	88.67

Продолжение таблицы Е.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		21.7	29.5	11.9	13.4	22.9	14.9	20.0	24.3	27.0	26.8	29.6	29.3
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.355	0.337	0.339	0.329	0.366	0.325	0.328	0.329	0.329	0.326	0.330	0.327
Процентное отношение по расходу стали к Sin балке		100%	95.2%	95.5%	92.8%	103.2%	91.8%	92.6%	92.9%	92.8%	91.9%	93.2%	92.3%
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 480×80×4		107.3%	102.1%	102.5%	99.6%	110.8%	98.5%	99.4%	99.7%	99.6%	98.6%	100.0%	99.0%

Таблица Е.11 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 5 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×5/ 30	ГС Каз. 360×60×5/ 30	ГС Каз. 420×70×5/ 30	ГС Каз. 480×70×5/ 30	ГС Каз. 480×80×5 /30	ГС Каз. 520×80×5 /30
1	2	3	4	5	6	7	8
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	280	360	420	480	480	520
Площадь поперечного сечения, см ²	5.00	14.59	18.88	22.00	24.88	25.20	25.70
Длина гофрированной стенки, мм	0.00	291.90	376.88	440.00	497.62	503.50	541.41
Момент инерции относительно центральной оси Y ₁ , см ⁴	0.1	22.31	51.56	83.4	92.87	125.8	126.79

Продолжение таблицы Е.11

1	2	3	4	5	6	7	8
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1\text{см}^2$ площади	0.020	1.529	2.731	3.791	3.733	4.992	4.934
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	0.14	1.24	1.654	1.9	1.932	2.2	2.221
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см^3	0.42	6.64	9.341	12.9	14.646	13.9	17.253
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V $\text{см}^3 / 1\text{см}^2$ площади	0.08	0.455	0.495	0.586	0.589	0.552	0.671
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1\text{кг}$ массы стали гофра	2.55	194.79	347.87	482.92	475.51	635.93	628.58
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , $\text{см}^4 / 1\text{кг}$ массы стали гофра	10.70	57.98	63.01	74.70	74.99	70.27	85.53
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		21.2	25.8	28.8	28.5	31.6	30.8
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.409	0.412	0.411	0.407	0.412	0.388
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 480х×80×5		99.3%	99.9%	99.8%	98.7%	100.0%	94.1%

Таблица Е.12 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 6 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×6/ 30	ГС Каз. 360×60×6/ 30	ГС Каз. 420×70×6/ 30	ГС Каз. 480×70×6/ 30	ГС Каз. 480×80×6/ 30	ГС Каз. 520×80×6/ 30
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	280	360	420	480	480	520
Площадь поперечного сечения, см ²	6.00	17.48	22.58	26.40	29.83	30.20	25.67
Длина гофрированной стенки, мм		291.40	376.29	439.50	497.10	503.00	541.05
Момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴	0.18	26.37	59.747	97	108.16	147.2	123.27
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1см ² площади	0.030	1.509	2.646	3.674	3.626	4.874	4.802
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	0.17	1.23	1.627	1.9	1.904	2.2	2.191
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см ³	0.6	13.57	10.784	15.1	17.08	20.3	16.973
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V см ³ / 1см ² площади	0.100	0.776	0.478	0.572	0.573	0.672	0.661
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	3.82	192.18	337.12	468.06	461.96	620.91	611.76
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	12.74	98.89	60.85	72.86	72.95	85.63	84.23
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		22.4	27.1	30.3	30.0	33.3	30.5
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.490	0.492	0.493	0.488	0.494	0.388
Процентное отношение по расходу стали к БГС Каз. 480×80×6		99.2%	99.7%	99.9%	98.8%	100.0%	78.5%

Таблица Е.13 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 8 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45×8/ 30	ГС Каз. 360×60×8/ 30	ГС Каз. 420×70×8/ 30	ГС Каз. 480×70×8/ 30	ГС Каз. 480×80×8/ 30	ГС Каз. 520×80×8/ 30
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	280	360	420	480	480	520
Площадь поперечного сечения, см ²	8.00	23.20	30.01	43.80	39.69	40.10	43.20
Длина гофрированной стенки, мм		290.00	375.14	438.50	496.06	501.50	539.94
Момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴	0.43	30.00	74.35	153.30	135.88	185.80	198.47
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1см ² площади	0.054	1.293	2.477	3.500	3.424	4.633	4.595
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	0.23	1.100	1.574	1.9	1.85	2.2	2.144
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см ³	1.07	7.500	13.524	23.4	21.536	25.7	27.655
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V см ³ / 1см ² площади	0.134	0.323	0.451	0.534	0.543	0.641	0.640
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	6.85	164.73	315.60	445.86	436.16	590.24	585.32
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	17.04	41.18	57.41	68.06	69.13	81.64	81.56
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		23.4	29.2	35.2	32.4	35.9	35.8
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.650	0.654	0.819	0.649	0.656	0.652
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 480×80×80		99.2%	99.8%	124.8%	99.0%	100.0%	99.4%

Таблица Е.14 – Сравнение характеристик внутренних сечений стенок толщиной 10 мм

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280×45× 10/30	ГС Каз. 360×60× 10/30	ГС Каз. 420×70× 10/30	ГС Каз. 480×70× 10/30	ГС Каз. 480×80× 10/30	ГС Каз. 520×80× 10/30
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	100	280	360	420	480	480	520
Площадь поперечного сечения, см ²	10.00	28.90	37.40	43.70	49.50	50.00	53.89
Длина гофрированной стенки, мм		289.00	374.15	437.00	495.05	500.50	538.86
Момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴	0.83	33.40	86.71	143.20	160.08	220.20	235.44
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1см ² площади	0.083	1.156	2.318	3.277	3.234	4.404	4.369
Радиус инерции относительно центральной оси Y_1 , см	0.29	1.1	1.523	1.8	1.798	2.1	2.09
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , см ³	1.67	8.8	16.017	16.017	25.534	30.4	32.986
Приведенный минимальный момент сопротивления относительно оси V см ³ / 1см ² площади	0.167	0.304	0.428	0.367	0.516	0.608	0.612
Приведенный момент инерции относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	10.57	147.22	295.33	417.44	411.94	561.02	556.61
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси Y_1 , см ⁴ / 1кг массы стали гофра	21.27	38.79	54.55	46.69	65.71	77.45	77.98
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		24.3	30.7	34.5	34.2	38.0	37.9
Расход стали на 1 п.м. гофрированной стенки		0.810	0.816	0.817	0.810	0.818	0.813
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 480×80×10		99.1%	99.7%	99.9%	99.0%	100.0%	99.5%

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Компьютерное моделирование консольных балок с гофрированной стенкой

Основной целью проведенного компьютерного моделирования консольных балок с гофрированной стенкой, ослабленных отверстиями различной формы и с различными методами подкрепления, было определение наиболее эффективной формы отверстия.

В 1986–1987 г. в Казахском отделении ЦНИИПроектстальконструкция были проведены экспериментальные исследования крупномасштабных моделей балок с тонкими гофрированными стенками, ослабленными отверстиями.

Исследовались вопросы несущей способности и предельных состояний образцов балок с отверстиями в стенках при работе на поперечный изгиб и определялась зависимость прогибов от нагрузки.

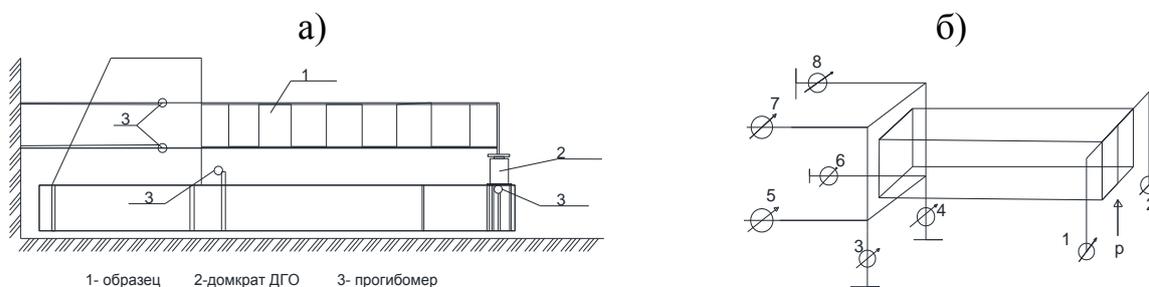
Экспериментальные исследования проводились с целью определения несущей способности и деформативности двутавровых балок с отверстиями в поперечно гофрированных стенках, работающих в упругой и упругопластической стадиях при одностороннем статическом нагружении.

Для экспериментальных исследований были изготовлены модели двутавровых балок с тонкой гофрированной стенкой с отверстиями различных конструктивных форм в виде консолей. Исключение влияния масштабного фактора, технологических особенностей сварки и сборки на результаты исследований было достигнуто проведением экспериментов на крупномасштабных моделях.

Для исключения влияния технологических особенностей сварки и сборки, эксперименты были проведены на образцах, изготовленных на Джамбулском ЗМК. Достоверность экспериментальных данных достигалась путем испытания двух образцов одного типа.

Компьютерное моделирование проводилось при помощи программного комплекса ЛИРА–САПР 2017.

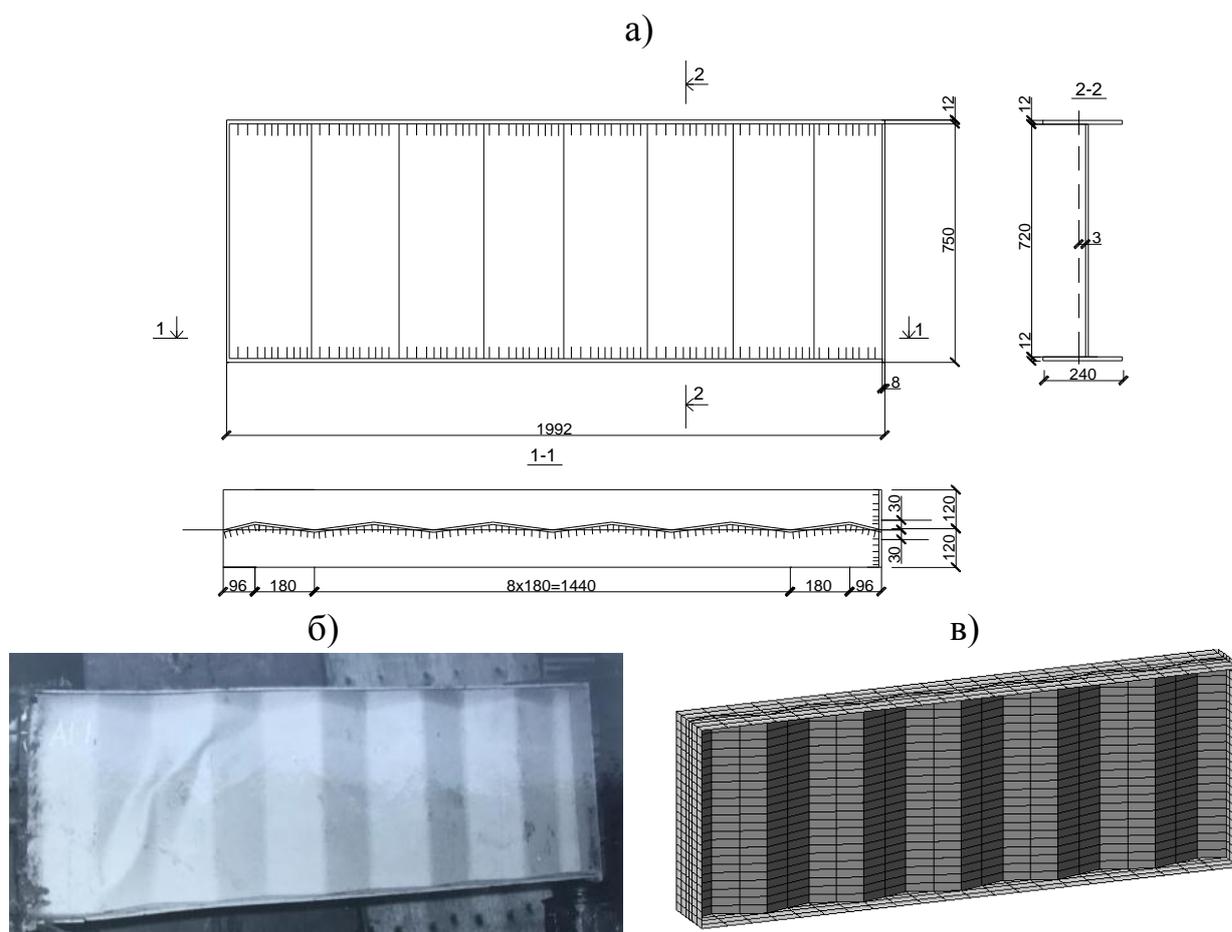
Все модели испытывались по консольной схеме. Перед началом проведения экспериментов модели балок приваривались к жесткому вертикальному элементу специальной установки (рисунок Ж.1).



а) Схема установки для испытаний;
б) Схема расположения прогибомеров и приложения нагрузки P .
Рисунок Ж.1 – Экспериментальная модель

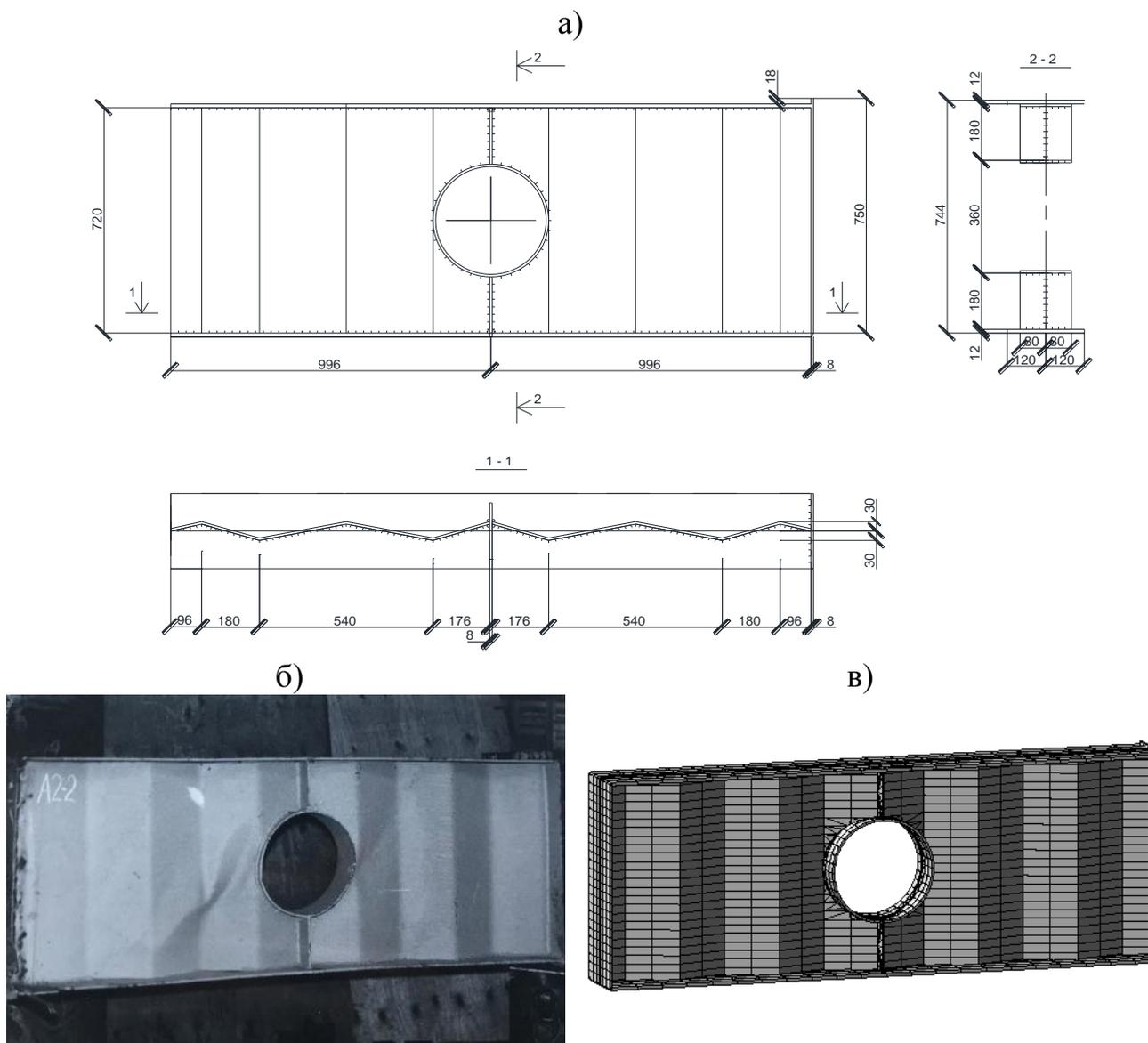
В зависимости от конструктивных решений отверстий все модели разбиты на шесть типов и замаркированы от А–1 до А–6 (рисунок Ж.2–Ж.8).

Балки А1–1 и А1–2 без отверстия. Длина балки l – 1990 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина волны гофра L_r – 180 мм, толщина полки t_f – 12 мм, ширина полки b – 240 мм и сталь марки С 345, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм (рисунок Ж.2).



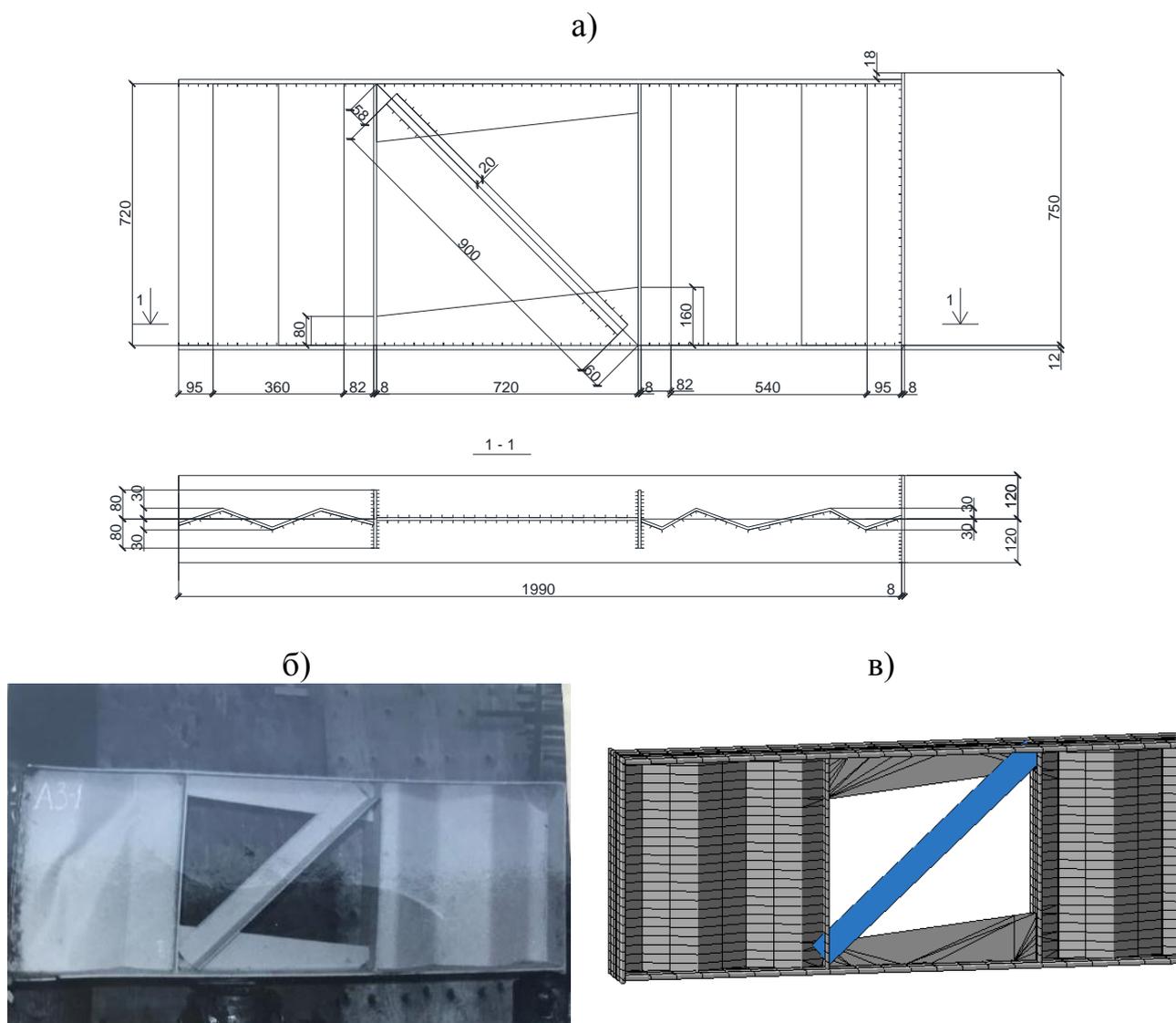
а) Балка А1–1; А1–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А1–1; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.2 – Модели балок А1–1 и А1–2

Балки А2–1 и А2–2 с отверстием. Длина балки l – 1990 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина волны гофра L_r – 180 мм, толщина полки t_f – 12 мм, ширина – 60 мм сталь марки С 345, длина полу волны гофра L_r – 180 мм, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм, диаметр отверстия d – 360 мм, отверстие подкреплено окаймлением толщиной t – 8 мм и шириной l – 160 мм. Ребра жесткости, расположенные с двух сторон над окаймлением и под ним, приняты толщиной t – 8 мм (рисунок Ж.3).



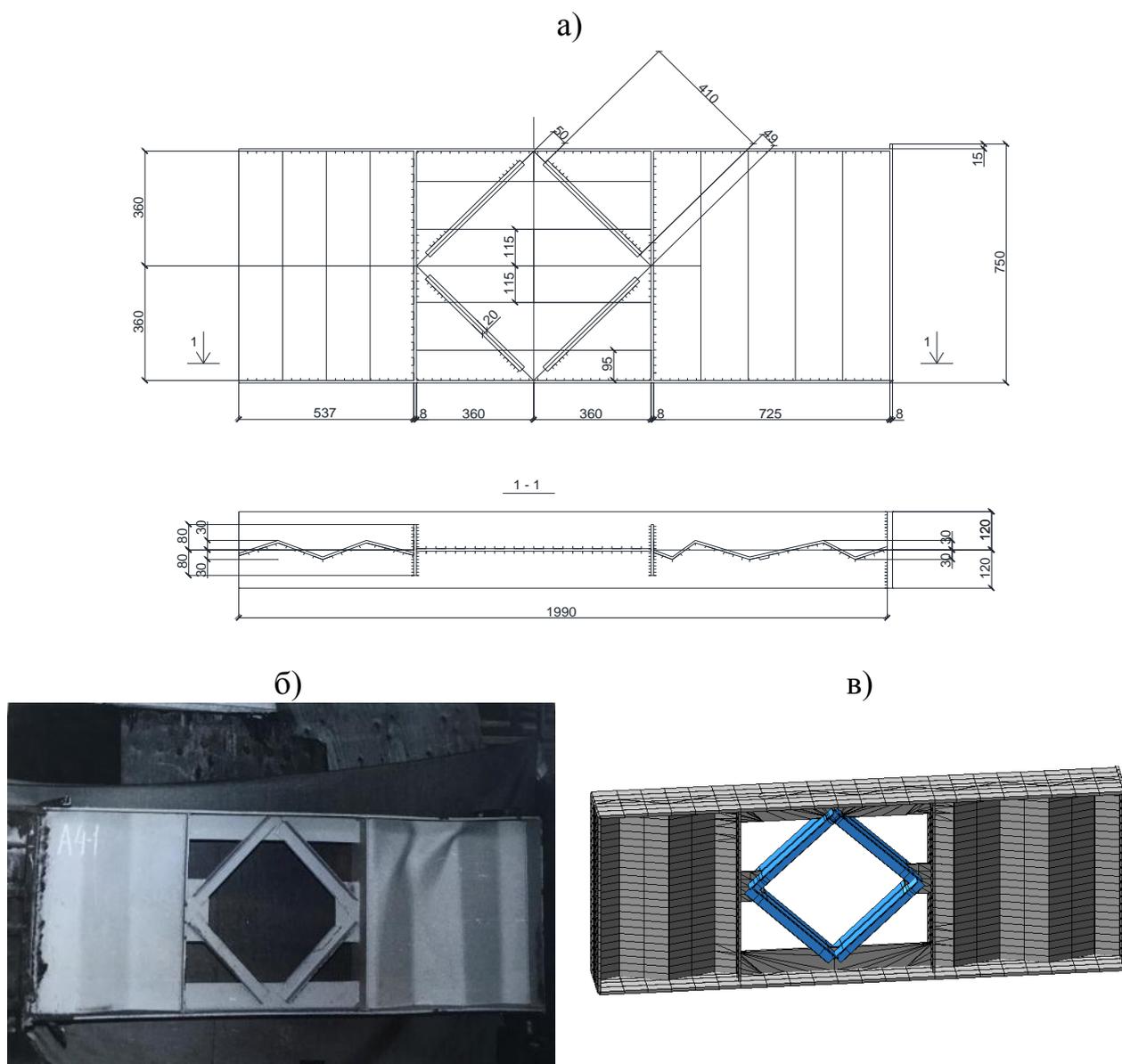
а) Балка А 2–1; А 2–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А 2–2; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.3 – Модели балок А 2–1 и А 2–2

Балки А3–1 и А3–2 с отверстием. Длина балки l – 1990 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина полу волны гофра L_r – 180 мм, толщина полков t_f – 12 мм, ширина полки b – 240 мм и сталь марки С 345, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм, отверстие представлено в виде отсека с одним раскосом из уголков 90×6 , в пределах отсека пояса образцов усилены листами t – 10 мм (рисунок Ж.4).



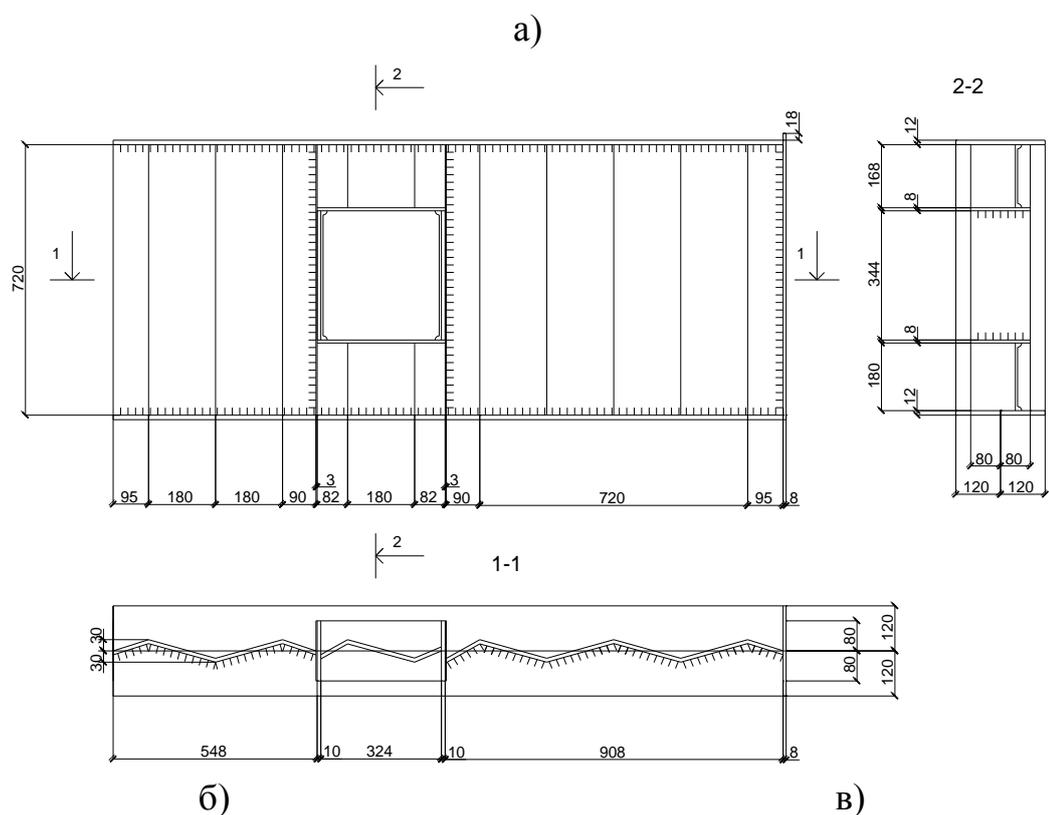
а) Балка А3–1; А3–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А3–1; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.4 – Модели балок А3–1 и А3–2

Балки А4–1 и А4–2 с отверстием. Длина балки l – 1990 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина полу волны гофра L_r – 180 мм, толщина полков t_f – 12 мм, ширина полки b – 240 мм и сталь марки С 345, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм, отверстие представлено в форме ромбической решетки, состоящей из парных уголков 50×5 из стали С235 (рисунок Ж.5.).



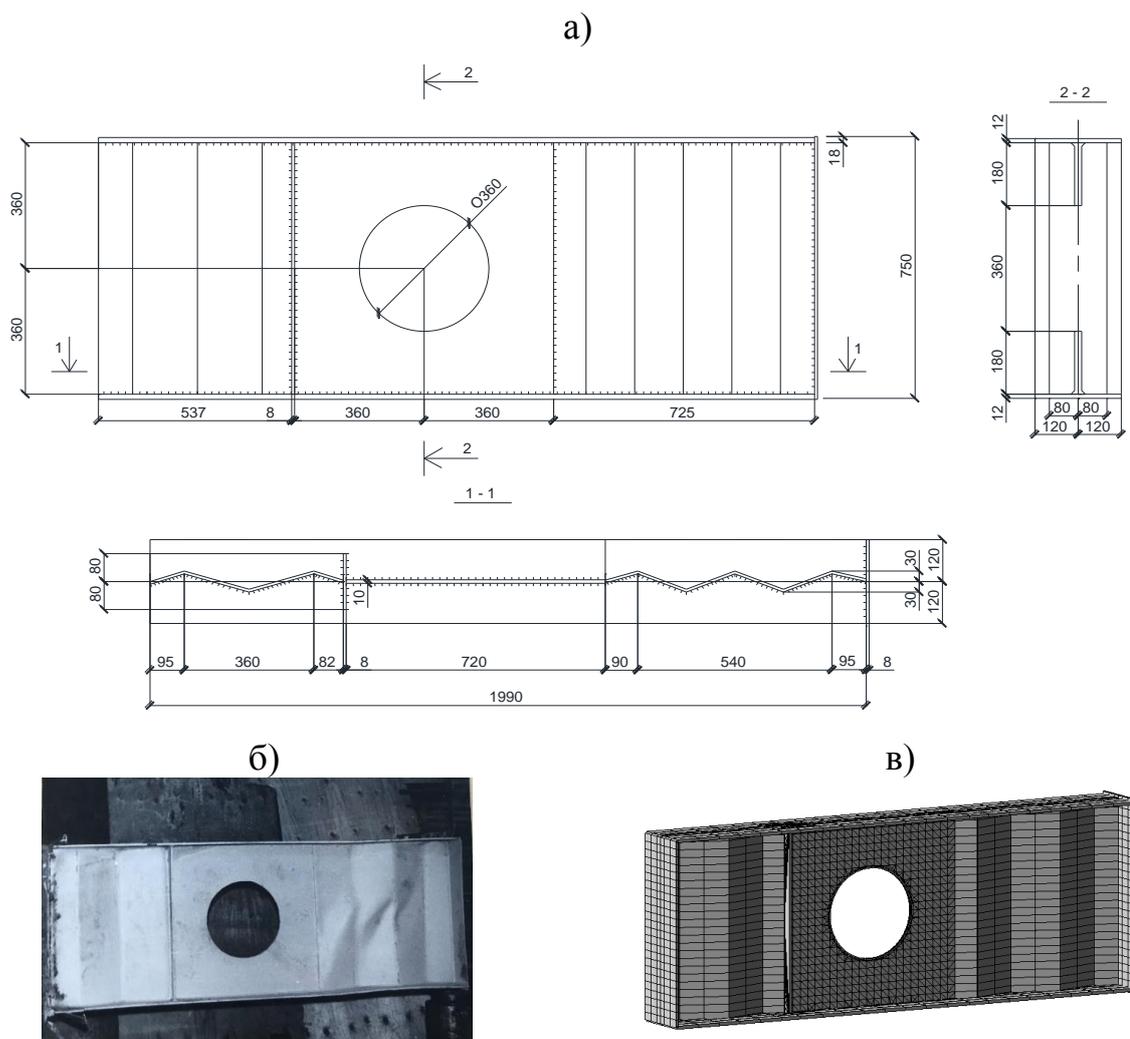
а) Балка А4–1; А4–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А4–1; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.5 – Модели балок А4–1 и А4–2

Балки А5–1 и А5–2 с отверстием. Длина балки l – 1810 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина полу волны гофра L_r – 180 мм, толщина полков t_f – 12 мм, ширина полки b – 240 мм и сталь марки С 345, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм, отверстие квадратной формы, выполнено путем вырезания стенки балки и обрамления отверстия вертикальными и горизонтальными ребрами b_p и $t_p = 160 \times 8$ мм (рисунок Ж.6).



а) Балка А5–1; А5–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А5–1; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.6 – Модели балок А5–1 и А5–2

Балки А6–1 и А6–2 с отверстием. Длина балки l – 1990 мм, высота стенки балки h_w – 720 мм и сталь марки С 235, толщина стенки t_w – 3 мм, высота волны гофра f_r – 60 мм, длина полу волны гофра L_r – 180 мм, толщина полки t_f – 12 мм, ширина полки b – 240 мм и сталь марки С 345, торцевая пластина (фланец) толщиной t – 8 мм, поясной шов односторонний с неравным катетом k_{fw} и $k_{ff} = 4 \times 6$ мм, диаметр отверстия d – 360 мм, отверстие, в зоне отверстия гофрированная стенка заменяется плоской толщиной 10 мм. (рисунок 3.7).



а) Балка А6–1; А6–2; б) Характер потери общей устойчивости стенки модели А6–1; в) модель в программном комплексе ЛИРА САПР
Рисунок Ж.7 – Модели балок А6–1 и А6–2

Для исследуемых образцов получены зависимости «нарузка – перемещение» по которым можно оценить работоспособность балок с различными конструктивными формами отверстий.

В таблице Ж.1 представлены величины прогибов экспериментальных $Y_{\text{э}}$, теоретических $Y_{\text{т}}$ и компьютерных $Y_{\text{к}}$, полученных в программном комплексе ЛИРА–САПР 2017. Значения прогибов балок получены на конце балки для моделей балок А1–А6. Также в таблице приведены отношения $Y_{\text{э}}/Y_{\text{к}}$, $Y_{\text{э}}/Y_{\text{т}}$ и $Y_{\text{э}}/Y_{\text{к}}$ и указана величина относительного прогиба $l/Y_{\text{т}}$, $l/Y_{\text{э}}$, и $l/Y_{\text{к}}$.

Выводы по проведенным испытаниям и компьютерному моделированию:

1. Выбор конструктивной формы отверстия зависит от размера пропускаемых коммуникаций и технологических требований конкретного завода изготовителя металлических конструкций.

2. При проектировании возможно использование отверстий различной формы, в случае использования эффективных способов подкрепления отверстий.

Таблица Ж.1. Результаты анализа полученных данных

№ п/п	Марка образца	Максимальная нагрузка на балку P_{max} , тс	Прогиб в мм									Поведение образцов при нагружении
			Y_T	Y_3	Y_K	Y_3/Y_K	Y_T/Y_K	Y_3/Y_T	l/Y_T	l/Y_3	l/Y_K	
1	A1	30	9.5	9.1	9.12	0.2%	-4.2%	4.2%	209.47	218.68	218.20	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.2)
2	A2-1	22	6.6	13.3	8.01	-66.0%	17.6%	-101.5%	301.52	149.62	248.44	При $P=10$ тс наблюдалось искривления отверстия из плоскости. При $P=20$ тс потерял устойчивость верхний пояс над отверстием. Отверстие повернулось из плоскости. При нагрузке $P=22$ тс произошла общая потеря устойчивости стенки (рисунок Ж.3)
3	A2-2	20.5	6.6	13.8	7.46	-85.0%	11.5%	-109.1%	301.52	144.20	266.76	При $P=10$ тс наблюдалось искривления отверстия из плоскости. При $P=20$ тс произошла местная потеря устойчивость стенки возле отверстия. При $P=20.5$ произошла общая потеря устойчивости стенки (рисунок Ж.3)
4	A3	31.25	9	9.7	10.7	9.3%	15.9%	-7.8%	221.11	205.15	185.98	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.4)
5	A4-1	27.5	8.7	9.2	8.23	-11.8%	-5.7%	-5.7%	228.74	216.30	241.80	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.5)
6	A4-2	30	8.7	12	8.98	-33.6%	3.1%	-37.9%	228.74	165.83	221.60	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.5)
7	A5	18.7	9	21.5	20.7	-3.9%	56.5%	-138.9%	201.11	84.19	87.44	Искривление рамки и потеря местной устойчивости гофров прилегающих к ней по мере приложения нагрузки (рисунок Ж.6)
8	A6-1	28.5	7.7	9	7.22	-24.7%	-6.6%	-16.9%	258.44	221.11	275.62	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.7)
9	A6-2	31.25	7.7	7.62	7.91	3.7%	2.7%	1.0%	258.44	261.15	251.58	Общая потеря устойчивости стенки при P_{max} (рисунок Ж.7)

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Численное исследование работы экспериментальных сварных двутавровых балок, ослабленных технологическими отверстиями

Планирование проведения численного исследования

Цель и программа исследования

Численные исследования проводились с целью оптимизации комбинированного расчета балки с гофрированной стенкой с отверстиями и без отверстия по существующим методикам СН РК 5.04–08–2004 Пособие по проектированию стальных конструкций [126 с.136], а также по данным [61 с.162]. Также необходимо выполнить расчет в программном комплексе ЛИРА–САПР–2017 методом конечных элементов.

В программу исследований входит:

1. Выполнение расчетов балок с гофрированной стенкой без отверстий и с отверстиями по имеющимся методикам;
2. Методом конечных элементов выполнить численное исследование в ПК ЛИРА–САПР балок с гофрированной стенкой без отверстий и с отверстиями.
3. Сопоставление полученных расчетов, их анализ и уточнение данных для инженерных расчетов.

Геометрические характеристики исследуемых балок

В рамках диссертационного исследования рассматривались пять вариантов гофрированных балок, одинаковой длины, высоты стенок, диаметров отверстий и толщины стенки, а также высоты и длины волны гофра, но отличающихся отсутствием и наличием отверстий, а также методами их подкреплений.

Отверстия расположены на расстоянии $2d$ диаметров ($2d$) отверстий от центра балки в каждую сторону. Данное расстояние между отверстиями является эффективным по результатам, полученным в главе 4 и в [145 с.28;]. Диаметр отверстия принят равным половине высоты гофрированной стенки $0,5 h_w - 300$ мм, эффективность применения данного диаметра приведена в главе 4 и в [130 с.26]. Отверстие по форме принято круглым. Для всех балок толщина стенки принята 2 мм, а по данным полученным из главы 3 для толщины стенки 2 мм, была определена наиболее эффективная высота волны гофра $f_r - 45$ мм и длина полу волны гофра $L_r - 140$ мм. Марка стали 3сп, предел текучести $R_y = 475,6$ Н/мм² (475,6 МПа).

Ниже приведены наиболее эффективные характеристики для гофрированных балок с отверстиями, полученные из глав 3 и 4.

Балка БГС–1 без отверстия, длина балки $l - 4200$ мм, высота стенки балки $h_w - 600$ мм, толщина стенки $t_w - 2$ мм при гибкости $\lambda=300$, высота волны гофра $f_r - 45$ мм, длина полу волны гофра $L_r - 140$ мм, толщина полки $t_f - 6$ мм, ширина полки $b - 150$ мм, торцевая пластина толщиной $t - 10$ мм. Длина гофрированной стенки $l - 4412$ мм. Центральная пластина (ребро жесткости) толщиной $t - 6$ мм;

Балка БГС–2 с отверстием, длина балки $l = 4200$ мм, высота стенки балки $h_w = 600$ мм, толщина стенки $t_w = 2$ мм при гибкости $\lambda=300$, высота волны гофра $f_r = 45$ мм, длина полу волны гофра $L_r = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, ширина полки $b = 150$ мм, торцевая пластина (фланец) толщиной $t = 10$ мм, диаметр отверстия $d = 300$ мм. Длина гофрированной стенки $l = 4412$ мм. Центральная пластина (ребро жесткости) толщиной $t = 6$ мм;

Балка БГС–3 с отверстием, длина балки $l = 4200$ мм, высота стенки балки $h_w = 600$ мм, толщина стенки $t_w = 2$ мм при гибкости $\lambda=300$, высота волны гофра $f_r = 45$ мм, длина полу волны гофра $L_r = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, ширина полки $b = 150$ мм, торцевая пластина (фланец) толщиной $t = 10$ мм, диаметр отверстия $d = 300$ мм, отверстие подкреплено окаймлением $t = 4$ мм и утолщением стенки на $2t_w$ в зоне отверстия, т.е $t_w = 4$ мм. Ширина окаймления 80 мм. Длина гофрированной стенки $l = 4412$ мм. Центральная пластина (ребро жесткости) толщиной $t = 6$ мм;

Балка БГС–4 с отверстием, длина балки $l = 4200$ мм, высота стенки балки $h_w = 600$ мм, толщина стенки $t_w = 2$ мм при гибкости $\lambda=300$, высота волны гофра $f_r = 45$ мм, длина полу волны гофра $L_r = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, ширина полки $b = 150$ мм, торцевая пластина (фланец) толщиной $t = 10$ мм, диаметр отверстия $d = 300$ мм, отверстие подкреплено окаймлением и ребрами жесткости толщиной $t = 4$ мм. Ширина окаймления и ребер жесткости 80 мм. Длина гофрированной стенки $l = 4412$ мм. Центральная пластина (ребро жесткости) толщиной $t = 6$ мм;

Балка БГС–5 с отверстием, длина балки $l = 4200$ мм, высота стенки балки $h_w = 600$ мм, толщина стенки $t_w = 2$ мм при гибкости $\lambda=300$, высота волны гофра $f_r = 45$ мм, длина полу волны гофра $L_r = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, ширина полки $b = 150$ мм, торцевая пластина (фланец) толщиной $t = 10$ мм, диаметр отверстия $d = 300$ мм, отверстие подкреплено окаймлением и ребрами жесткости толщиной $t = 4$ мм. Ширина окаймления и ребер жесткости 80 мм. Загиб внешней грани окаймления принят толщиной $t = 3$ мм и высотой $h = 25$ мм. Длина гофрированной стенки $l = 4412$ мм. Центральная пластина (ребро жесткости) толщиной $t = 6$ мм.

В таблице И.1 приведены геометрические характеристики представленных пяти образцов сварных двутавровых балок с отверстиями и без отверстий.

Таблица И.1 – Геометрические характеристики исследуемых образцов

Мо- дель	Размеры профиля, см					Диа- метр (d) отвер- стий, см	Шаг отвер- стий,	Вариант усиления от- верстий	Параметры гофр		Масса балки, кг	Длина модели L, см
	h	b	t_w	t_f	h_w				L_r см	f_r см		
БГС–1	61,2	15	0,20	6	60	–	–	Без отверстий	28	4,5	118,36	420
БГС–2	61,2	15	0,20	6	60	30	$2d$	Отверстия без подкрепления	14	4,5	116,14	420

Продолжение таблицы И.1

БГС-3	61,2	15	0,20	6	60	30	$2d$	Отверстия с окаймлением и утолщением стенки на $2 t_w$	14	4,5	131,03	420
БГС-4	61,2	15	0,20	6	60	30	$2d$	Отверстия с окаймлением и парными ребрами жесткости	14	4,5	126,06	420
БГС-5	61,2	15	0,20	6	60	30	$2d$	Отверстия с окаймлением с загибом и парными ребрами жесткости	14	4,5	128,1	420

На рисунке И.1 схематически показана длина и высота треугольного гофра.

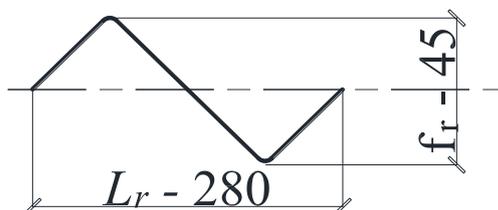


Рисунок И.1– Двутавровая балка с поперечно-гофрированной стенкой с гофрами треугольного очертания: L_r – длина волны гофра равная 280 (мм); f_r 45– высота волны гофра (мм).

Загружение балок осуществлялось по схеме, представленной на рисунке 5.2. Величина расчетной сосредоточенной нагрузки принята $P = 60$ кН.

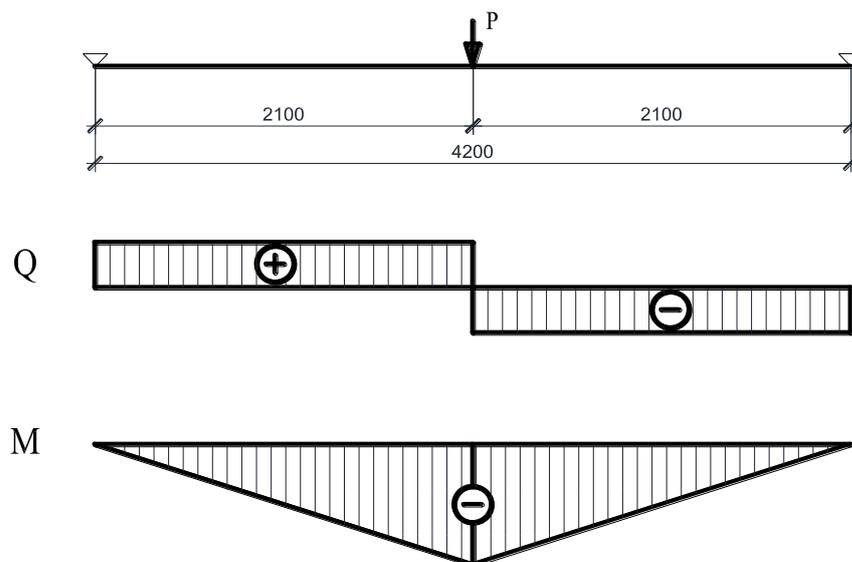


Рисунок И.2 – Схема нагружения моделей

Аналитический расчет гофрированной балки без отверстия БГС–1

Приведенный расчет балки с гофрированной стенкой выполнен по методике [126 с.136]:

Максимальный момент в гофрированной балке:

$$M = \frac{Pl}{4} = 63 \text{ кН. м,}$$

где P – расчетное значение нагрузки (силы), 60 кН;

l – длина гофрированной балки, 4,2 м.

Максимальная поперечная сила в гофрированной балке:

$$Q_{max} = \frac{P}{2} = 30 \text{ кН;}$$

Устойчивость поперечно–гофрированных стенок:

$$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w \cdot t_w \cdot \gamma_{wc}} = 27,78 \text{ МПа,}$$

где $\tau_{xy,max}$ – касательное напряжение в стенке (максимальное) от расчетной нагрузки;

Q_{max} – максимальная поперечная сила в балке, 30 кН;

$\gamma_{wc} = 0,9$ – коэффициент условия работы на срез балки с поперечно–гофрированной стенкой;

t_w – толщина гофрированной стенки, 2 мм;

h_w – расчетная высота стенки, 0,6 м.

Местная устойчивость при локальном напряжении $\sigma_{loc} = 0$:

$$\tau_{xy,max} / \tau_{p,cr} \leq \gamma_c = 0,099 \leq 1,$$

где $\tau_{p,cr}$ – критическое касательное напряжение потери местной устойчивости;

γ_c – коэффициент условий работы, равный 1;

Критическое касательное напряжение потери местной устойчивости для треугольного очертания гофров:

$$\tau_{p,cr} = \frac{1,12 C_{p,cr} R_s}{\lambda_c^2} = 281,52 \text{ МПа,}$$

где $C_{p,cr}$ – отношение высоты стенки и ширины панели гофра, коэффициент принимается по таблице 27 [101] в зависимости от отношения высоты стенки и ширины панели гофра (h_w/b_w), равное 5,859;

R_s – расчетное сопротивление на сдвиг:

$$R_s = \frac{0.58R_{yn}}{\gamma_m} = 275,85 \text{ МПа},$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление, 475,6 МПа;

γ_m – коэффициент надежности по материалу, равный 1;

λ_c – условная гибкость панели гофра:

$$\lambda_c = \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 3,53,$$

где E – модуль упругости, равный 206000 МПа;

R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести для термоупрочненной стали 3сп, равное 475,6 МПа;

t_w – толщина гофрированной стенки, 2 мм;

b_w – ширина панели гофра в мм, для балки 140×45×2:

$$b_w = \sqrt{l_r^2 + f^2} = 147,05 \text{ мм},$$

где l_r – длина полуволны гофра равная 140 (мм);

f – высота волны гофра, 45 мм.

Общая устойчивость в случаи, когда локальное напряжение $\sigma_{loc}=0$:

$$\tau_{xy,max} / \tau_{o,cr} \leq \gamma_c = 0,19 \leq 1,$$

где $\tau_{o,cr}$ – критическое касательное напряжение общей потери устойчивости.

Критическое касательное напряжение потери общей устойчивости для треугольного очертания гофров:

$$\tau_{o,cr} = \frac{1,12C_{o,cr} \cdot R_s}{\lambda_w^2} = 145,48 \text{ Мпа},$$

где R_s – расчетное сопротивление на сдвиг:

$$R_s = \frac{0.58R_{yn}}{\gamma_m} = 275,85 \text{ МПа},$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление, 475,6 Мпа;

γ_m – коэффициент надежности по материалу, равный 1;
 где $\bar{\lambda}_w$ – условная гибкость поперечно-гофрированной стенки:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 14,41,$$

где E – модуль упругости, равный 206000 МПа;
 R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести для термоупрочненной стали 3сп, равное 475,6 МПа;
 h_w – расчетная высота стенки, 600 мм;
 t_w – толщина гофрированной стенки, 2 мм;
 $C_{o,cr}$ – коэффициент отношения параметров (b_w и f):

$$C_{o,cr} = 5,34 + (5,5 \cdot \beta^2 - 0,6) \cdot \sqrt[3]{\frac{\gamma}{4(7 \cdot \beta^2 - 5)}} = 97,85,$$

где β – отношение высоты гофрированной стенки к ширине панели гофра:

$$\beta = h_w / b_w = 4,08,$$

где γ – отношение жесткости гофрированной стенки к цилиндрической жесткости плоской стенки одинаковой толщины:

$$\gamma = 0,91 \left(\frac{f}{t_w} \right)^2 = 460,68,$$

где f – высота волны гофра, 45 мм;
 t_w – толщина гофрированной стенки, 2 мм.

Местная устойчивость гофрированных стенок балок симметричного сечения требует расчета при локальном напряжении, $\sigma_{loc} \neq 0$, и определяется по формуле:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}} \right)^2} \leq \gamma_c = 0,73 \leq 1,$$

где σ_{loc} равен:

$$\sigma_{loc} = \frac{P}{t l_{ef}} \leq R_y \gamma_c = 267,86 \text{ МПа} \leq 475,6 \text{ МПа},$$

где P – расчетное значение нагрузки (силы), 60 кН;
 l_{ef} – условная длина распределения нагрузки, определяемая в зависимости от условий опирания:

$$l_{ef} = b + 2t_f = 112 \text{ мм},$$

где t_f – толщина верхнего пояса балки, 6 мм;

b – ширина опираемого прогона на сварную двутавровую балку, 100 мм;

γ_c – коэффициент условия работы составной балки равный 1;

R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести для термоупрочненной стали 3пс равное 475,6 МПа;

$\sigma_{loc,cr}$ – нормальные критические напряжения гофрированной стенки, при действии сосредоточенной нагрузки:

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{0,8C_1R_y}{\bar{\lambda}_c^2} = 281,06 \text{ Мпа},$$

где C_1 – отношение высоты стенки и ширины панели гофра, коэффициент принимается по таблице 28 [101] в зависимости от отношения b_w/h_w и значения δ , равное 9,22:

$$\delta = 0,8 \frac{b_f}{h_w} \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^3 = 5,4,$$

где b_w и h_f – ширина и толщина сжатого пояса балки, 150 и 6 мм соответственно;

h_w – расчетная высота стенки, 600 мм;

t_w – толщина гофрированной стенки, 2 мм.

Общая устойчивость гофрированных стенок балок симметричного сечения требует расчета при локальном напряжении, $\sigma_{loc} \neq 0$:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{y,cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{o,cr}} \right)^2} \leq \gamma_c = 0,972 \leq 1,$$

где $\sigma_{y,cr}$ – нормальные критические напряжения потери устойчивости гофрированной стенки, рассчитанной на продольный изгиб из плоскости, как стойки нагруженной сосредоточенной силой P :

$$\sigma_{y,cr} = \varphi R_y \leq \sigma_{loc,cr} = 436,6 \text{ МПа} \leq 281,05 \text{ МПа}$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый по таблице 72 [126 с.114], равный 0,918 для условной стойки, которая центрально сжата, при этом гибкость:

$$\lambda = \frac{2,5h_w}{f} = 33,33$$

где f – высота волны гофра, 45 (мм);
 h_w – расчетная высота стенки, 600 мм.

В случае, когда $\sigma_{y,cr} \geq \sigma_{loc,cr}$, то при проверке общей устойчивости гофрированной стенки, следует принимать $\sigma_{loc,cr}$ вместо $\sigma_{y,cr}$.

По выше проведенному расчету можно сделать следующие выводы: подобранное сечение обеспечивает: местную и общую устойчивость панели гофра, а также прочность балки с гофрированной стенкой.

Нормативный прогиб балки

Величина предельно допустимого прогиба гофрированной балки длиной 4,2 м составляет $1/170 l$ или 25 мм.

Расчетный прогиб гофрированной балки без отверстия БГС–1:

$$Y_p = \frac{Pl^3}{48EJ_x} + \frac{PlK_w}{4GA_w} = 3,22 \text{ мм},$$

где P – расчетное значение нагрузки (силы), 60 кН;

E – модуль упругости, равный 206000 МПа;

l – длина рассматриваемой модели балки, 4,2 м;

G – модуль сдвига прокатной стали, равный 81000 МПа;

J_x – момент инерция поперечного сечения:

$$J_x = \frac{b_f t_f h_f^2}{2} = 16854 \text{ см}^2,$$

где A_w – площадь гофрированной стенки:

$$A_w = h_w t_w = 12 \text{ см}^2,$$

где K_w – коэффициент фактический длины стенки:

$$K_w = \frac{l_r}{l} = 1.05,$$

где l_r – развернутая длина гофрированной стенки балки, равная 4,412 м.

Аналитический расчет гофрированной балки с отверстиями БГС–2

Приведенный расчет балки с гофрированной стенкой, ослабленной отверстиями, выполнен по методике [61 с.162]:

Максимальный момент в гофрированной балке с отверстием:

$$M = \frac{P \cdot l \cdot x}{2} - \frac{l \cdot x \cdot x}{2} = 220 \text{ кНм},$$

где P – расчетное значение нагрузки (силы), 60 кН;

l – длина гофрированной балки, 4,2 м.

Максимальная поперечная сила в гофрированной балке с отверстием:

$$Q_{max} = \frac{P \cdot l}{2} - P \cdot x = 18 \text{ кН},$$

где x – расстояние от опоры до центра отверстия.

Касательные напряжения в гофрированной стенке в сечении с отверстием:

$$\tau_{xy} = \frac{P}{h_w t_w} = 100 \text{ МПа},$$

где h_w – высота стенки в зоне отверстия, равная 30 см

Концентрация напряжения при изгибе балки:

$$K_Q = 0,1 \cdot \lambda_w \left(\frac{d}{h_w}\right)^2 + 2 \cdot \frac{d}{h_w} + 4 = 5,075,$$

где d – диаметр отверстия, равен 30 см;

λ_w – гибкость поперечно-гофрированной стенки:

$$\lambda_w = \frac{h_w}{t_w} = 300,$$

Максимальное напряжение на контуре отверстия:

$$\sigma_k = \tau_{xy} \cdot K_Q \leq 1,15 R_y = 507,5 \text{ МПа} < 546,94 \text{ МПа} \cdot$$

Прочность участка гофрированной стенки, ослабленного отверстием, не обеспечена, следовательно, необходимо усиление дополнительное усиление кругового отверстия.

Местная устойчивость панели гофра, ослабленного круговым отверстием:

$$\tau_{p,cr}^h = \tau_{p,cr} \cdot \gamma_{wc}^{Me} \geq \tau_{xy} = 160 \geq 100$$

где $\tau_{o,cr}$ – критическое касательное напряжение потери общей устойчивости для треугольного очертания гофров, равное 145,02 МПа:

γ_{wc}^{Me} – коэффициент условия работы гофрированной стенки, ослабленной отверстием, при проверке местной устойчивости, равный:

$$\gamma_{wc}^{Me} = 1 - 1,85 \left(\frac{d}{b_w} \right) + 0,95 \cdot \left(\frac{d}{b_w} \right)^2 = 1,1$$

где b_w – ширина сжатого пояса балки, 15 см;

Местная устойчивость гофрированной стенки, ослабленной отверстием, обеспечена

Общая устойчивость панели гофра, ослабленного круговым отверстием:

$$\tau_{o,cr}^h = \tau_{o,cr} \cdot \gamma_{wc} \geq \tau_{xy} = 160 \geq 100$$

где γ_{wc} – 0,3 – коэффициент условия работы гофрированной стенки, ослабленной отверстием при: $0,25 < \frac{d}{h_w} = \frac{30}{60} = 0,25 \leq 0,5$

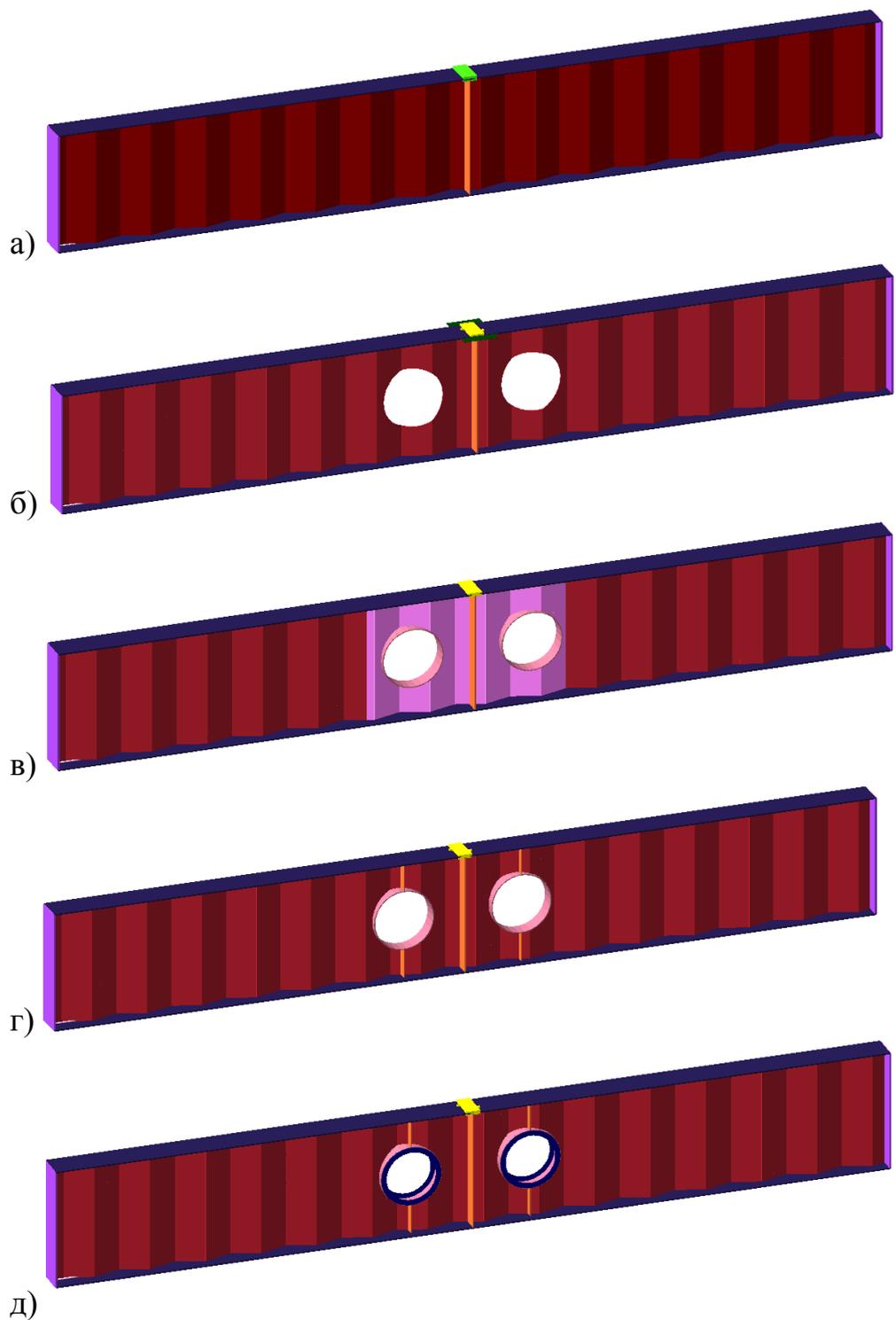
Общая устойчивость гофрированной стенки, ослабленной отверстием, обеспечена.

Расчет балок с гофрированной стенкой с использованием ЭВМ

При помощи программы ЛИРА–САПР–2017 методом конечных элементов (КЭ) было проведено численное параметрическое исследование 5 – ти сварных гофрированных двутавровых балок, из которых одна балка без отверстия и четыре балки с отверстиями. Разбивка на конечные элементы выполнена автоматически. Размер конечных элементов 30×35 мм. Длина всех балок принята равной 4200 мм. Моделирование выполнялось в натуральную величину балок. Исследуемые модели имели ограничение по перемещению по правой и левой грани стенки и нижнего пояса по оси y и по левой грани нижнего пояса по оси x , то есть слева шарнирно неподвижное опирание, а справа шарнирно подвижное.

Модуль упругости для всех балок принят $E = 2060000$ кг/см², коэффициент Пуассона равен 0,3. Радиус скругления гофров при расчете не учитывался. Номинальное значение предела текучести для стали 3сп $R_y = 475,6$ Н/мм² (475,6 МПа). Для модели балки длиной 4200 мм максимально допустимый прогиб равен $1/170 l$ или 25 мм. Нагрузка на балку передается в ее центральной части над ребром жесткости через жёсткую пластину размером 100×20 мм и длиной 200 мм, находящуюся в непосредственном контакте с поверхностью пластины верхней полки балки.

Модели балок с гофрированной стенкой показаны на рисунке И.3 и образуют готовые с конечно–элементной разбивкой сетки.



а) балка БГС – 1 с гофрированной стенкой без отверстий; б) балка БГС – 2 с гофрированной стенкой с двумя отверстиями без подкрепления; в) балка БГС – 3 с гофрированной стенкой с двумя отверстиями, подкрепленными окаймлением и утолщением стенки в зоне отверстий на $2 t_w$; г) балка БГС – 4 с гофрированной стенкой с двумя отверстиями, подкрепленными окаймлением и парными ребрами жесткости; д) балка БГС – 5 с гофрированной стенкой с двумя отверстиями, подкрепленными окаймлением с загибом и парными ребрами жесткости.

Рисунок И.3 – Модели балок в программном комплексе ЛИРА – САПР

По проведенным компьютерным расчетам моделей балок были получены напряжения и деформации, обозначенные на рисунках И.4 – И.7.

Балка БГС – 1

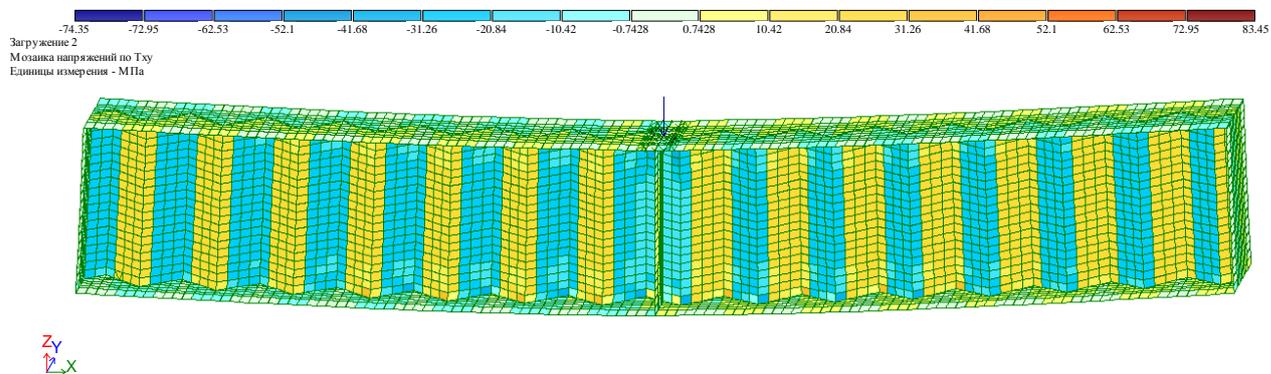


Рисунок И.4 – Касательные напряжения балки БГС – 1

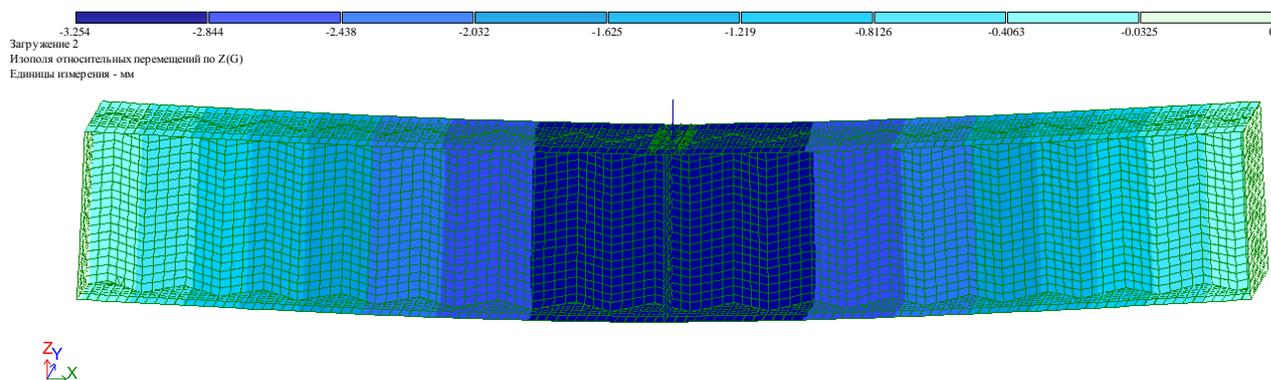


Рисунок И.5 – Вертикальный прогиб балки БГС–1

Балка БГС–2

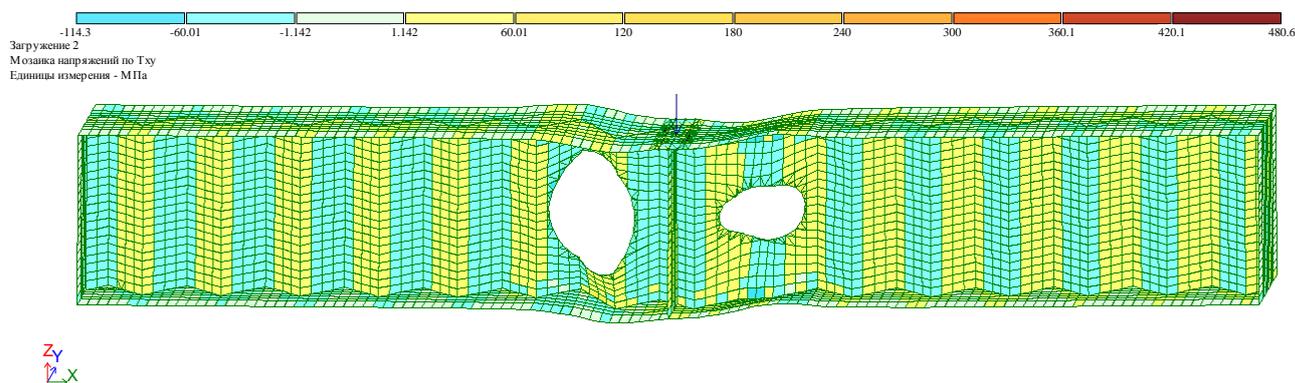


Рисунок И.6 – Касательные напряжения балки БГС–2

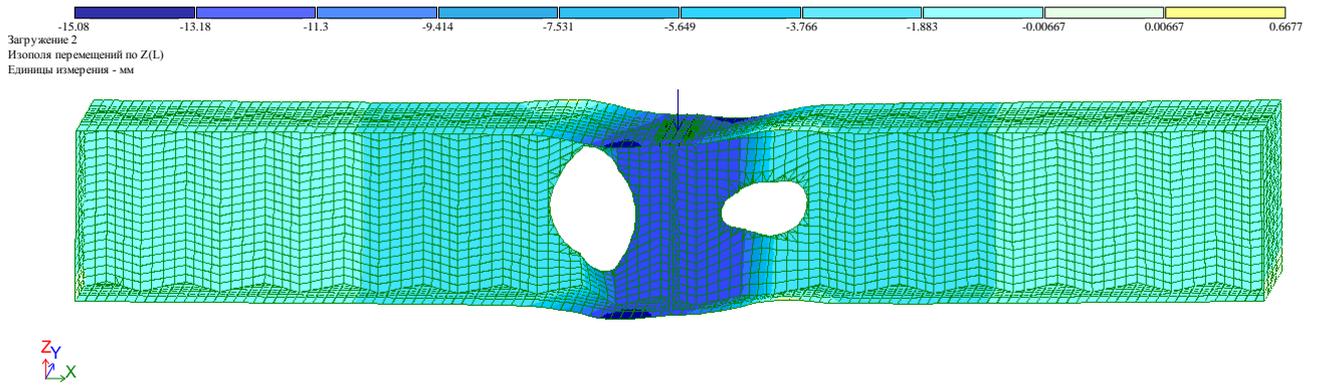


Рисунок И.7 – Вертикальный прогиб балки БГС–2

Также был выполнен расчет балок с гофрированной стенкой, ослабленных отверстиями, с различными вариантами усиления, методом конечных элементов.

На рисунке И.8 – И.13 представлены величины касательных напряжений τ_{max} и значения вертикальных прогибов балок БГС–3, БГС–4 и БГС–5.

Балка БГС–3

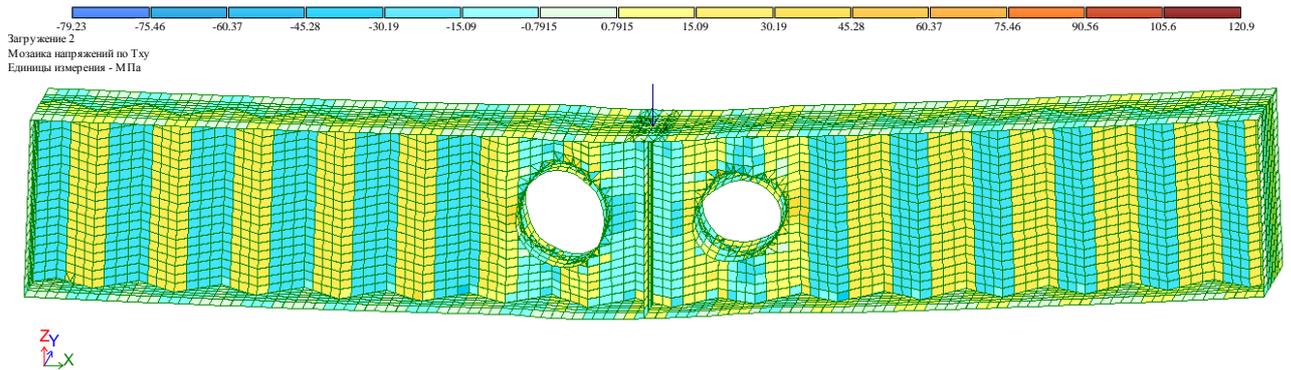


Рисунок И.8 – Касательные напряжения балки БГС–3

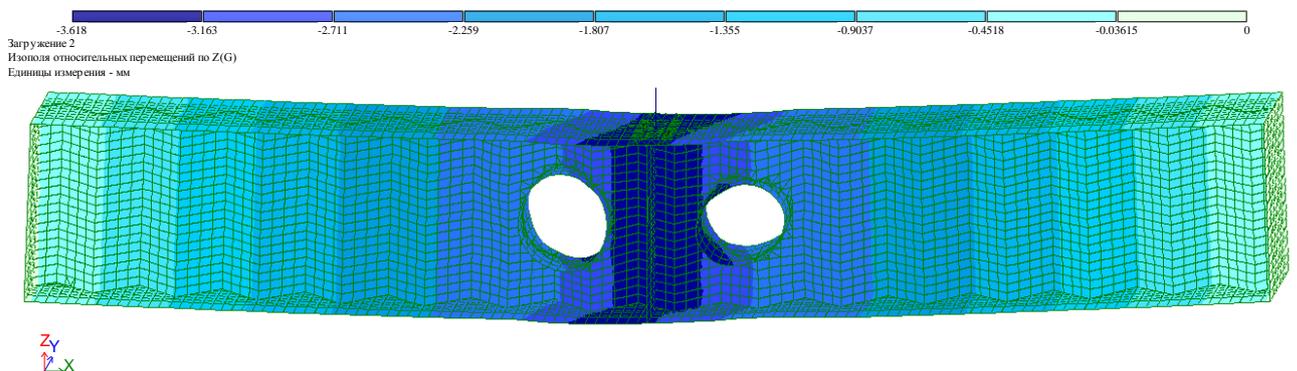


Рисунок И.9 – Вертикальный прогиб балки БГС–3

Балка БГС-4

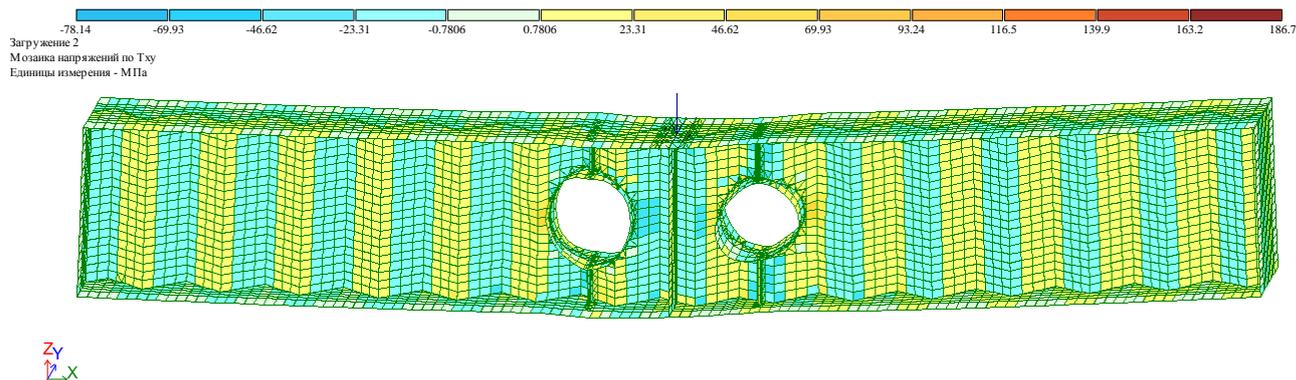


Рисунок И.10 – Касательные напряжения балки БГС-4

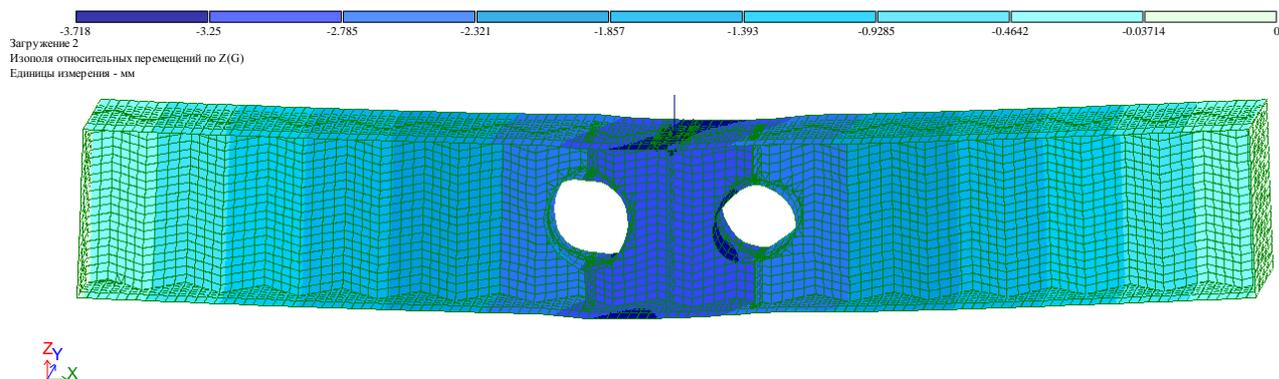


Рисунок И.11 – Вертикальный прогиб балки БГС-4

Балка БГС-5

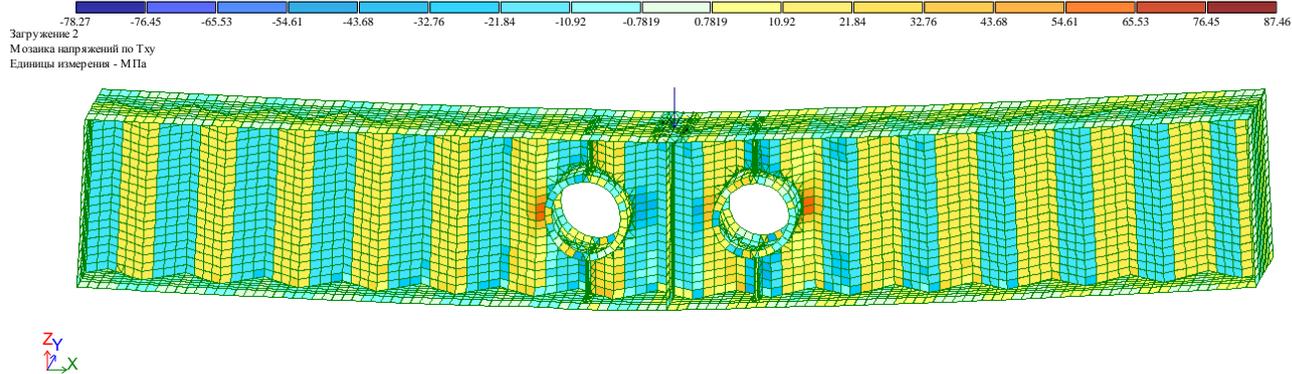


Рисунок И.12 – Касательные напряжения балки БГС-5

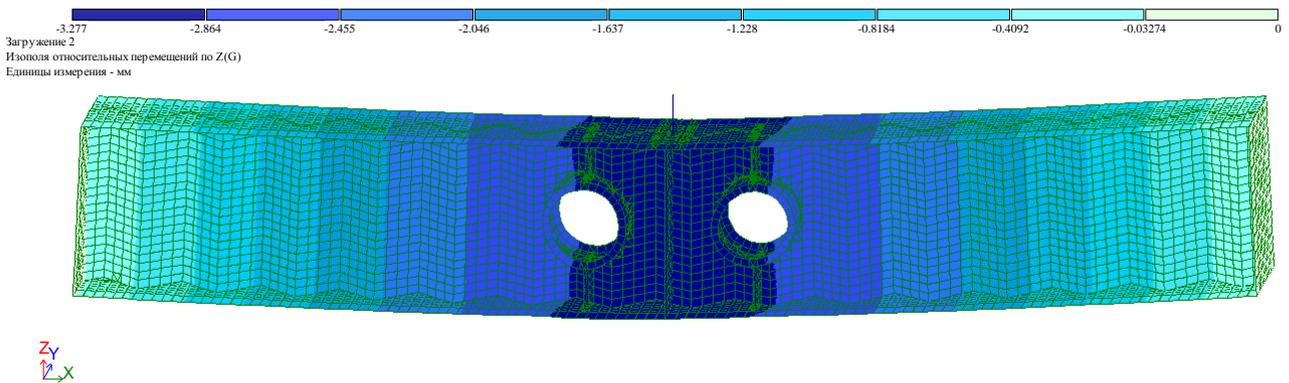


Рисунок И.13 – Вертикальный прогиб балки БГС–5

Сравнительный анализ теоретического и компьютерного расчетов балок с гофрированными стенками

Выполненные ранее теоретические расчеты дают возможность провести сопоставительный анализ напряжений и деформаций балок одинакового поперечного сечения с отверстиями в стенке и без них при одинаковых условиях работы, а также проверить данные расчета методом конечных элементов.

В таблице И.2 представлены величины теоретических напряжений $\tau_{max, t}$, $\tau_{max, c}$ и компьютерных в стенке, а также значений прогибов теоретических Y_T и компьютерных Y_K прогибов балки БГС–1 без отверстий и БГС–2 с отверстиями.

Таблица И.2 – Результаты сравнения теоретического и компьютерного расчетов балок БГС–1 и БГС–2

№	Модель балки	Расчетная сосредоточенная нагрузка на балку $\sum P, \text{ кН}$	Касательные напряжения, теоретические $\tau_{max, t}$ Мпа	Касательные напряжения, компьютерные $\tau_{max, c}$ Мпа	Погрешность, %	Прогиб (мм) при сосредоточенной нагрузке 45 кН		
						Y_T	Y_K	Погрешность, %
1	2	3	7	8	9	10	11	12
1	БГС–1	60	62	83,45	7,3	3.22	3,254	1,04
2	БГС–2	60	507	480,6	5,5	–	15,75	–
3	БГС–3	60	–	120,9	–	–	3,62	–
4	БГС–4	60	–	186,7	–	–	3,72	–
5	БГС–5	60	–	87,46	–	–	3,28	–

Выводы

1. По существующим методикам было выполнено численное исследование балок с гофрированной стенкой с отверстиями БГС–2 и балки без отверстия БГС–1, для всех балок принята одинаковая расчетная нагрузка, определены касательные напряжения и нормативный прогиб.

2. Методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА –САПР 2017 по имеющимся параметрам были выполнены расчеты балки с гофрированной стенкой без отверстий БГС–1 и балок БГС–2÷5 с гофрированной стенкой, ослабленных двумя отверстиями с различными вариантами подкрепления. Приведена мозаика касательных напряжений и изополя перемещений (прогибов) рассматриваемых образцов.

3. По результатам двух расчетов прогибов был выполнен сравнительный анализ полученных данных: так для балки БГС–1 разница между компьютерным и теоретическим расчетом прогибов составляет 1,04%, а разница между касательными напряжениями 7,3 %; для балки БГС–2 разница между касательными напряжениями 5,5 %;

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Протокол испытания листа толщиной 2 мм

«САПА ИНТЕРСИСТЕМ» ЖШС
сыңақ орталығы



Испытательный центр
ТОО «САПА ИНТЕРСИСТЕМ»

ҚР, 050061, Алматы қ., Ташкентская кеш., 473 А
тел./факс: +7 7727/ 399-1111, 399-8540, 399-8541
email: info@sapaiskz.com, www.sapaiskz.com

05.08.2016 ж. № КЗ.И.02.0138
Аккредиттеу аттестаты

ҚР, 050061, г. Алматы, ул. Ташкентская, 473 А
тел./факс: +7 7727/ 399-1111, 399-8540, 399-8541
email: info@sapaiskz.com, www.sapaiskz.com

Аттестат аккредитации
№ КЗ.И.02.0138 от 05.08.2016 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №172/2019КМ

От 06 сентября 2019 г.

Акт отбора образцов (номер, дата): письмо б/н от 02.09.2019 г. АО «КазГАСА»

Наименование продукция: Лист №1, S2,0мм

Место отбора: Лаборатория

Изготовитель: информация не предоставлена

Заявитель (адрес): АО «КазГАСА»

Дата изготовления продукции: информация не предоставлена.

Дата поступления продукции на испытания: 02.09.2019 г.

Дата проведения испытаний: 02.09.2019 г.-06.09.2019 г.

Количество образцов Фрагмент листа №1 Лист S2мм

НД на продукцию: Нормативный документ не предоставлен

Вид испытаний: Определение химического состава и механических свойств Вх.177/19

Наименование определяемых характеристик	НД на метод испытания	Норма по НД для стали. Зсп ГОСТ 380-2005	Фактическое значение
1 Массовая доля углерода, (C), %,	ГОСТ 12344-88	0,14-0,22	0,18
2 Массовая доля кремния, (Si). %	ГОСТ 12346-78	0,15-0,30	0,42
3 Массовая доля марганца, (Mn). %	ГОСТ 12348-78	0,40-0,65	0,40
4 Массовая доля хрома, (Cr). %,	ГОСТ 12350-78	Не более 0,30	0,10
5 Массовая доля никеля, (Ni). %,	ГОСТ 12352-81	Не более 0,30	следы
6 Массовая доля серы, (S). %,	ГОСТ 12345-88	Не более 0,050	0,014
7 Массовая доля фосфора, (P). %,	ГОСТ 12347-77	Не более 0,040	0,018
8 Временное сопротивление разрыву, δ_b , Н/мм ² ,	ГОСТ 1497-84	370-480	475,6
9 Относительное удлинение, %,		23-26	7,5
10 Предел текучести, δ_t , Н/мм ²		205-245-	418,7

Примечание: Ближайшим аналогом марки стали, из которой изготовлен стальной лист S2,0 мм является сталь Зсп ГОСТ 380-2005 «Сталь углеродистая.обыкновенного качества.

Марки»

Главный специалист
Начальник ИЛ
Начальник ИЦ

Росина Т.А.
Юровский А.В.
Валуцкая Н.И.

Протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.
Протокол не может быть полностью или частично воспроизведен или распространен без разрешения Испытательного центра.

00012161

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Протокол испытания листа толщиной 6 мм

«САПА ИНТЕРСИСТЕМ» ЖШС
сыңақ орталығы



Испытательный центр
ТОО «САПА ИНТЕРСИСТЕМ»

ҚР, 050061, Алматы қ., Ташкентская көш., 473 А
тел./факс: +7 727/ 399-1111, 399-8540, 399-8541
email: info@sapaiskz.com, www.sapaiskz.com

05.08.2016 ж. № КЗ.И.02.0138
Аккредиттеу аттестаты

РК, 050061, г. Алматы, ул. Ташкентская, 473 А
тел./факс: +7 727/ 399-1111, 399-8540, 399-8541
email: info@sapaiskz.com, www.sapaiskz.com

Аттестат аккредитации
№ КЗ.И.02.0138 от 05.08.2016 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №173/2019КМ

От 06 сентября 2019 г.

Акт отбора образцов (номер, дата): письмо б/н от 02.09.2019 г. АО «Каз ГАСА»

Наименование продукция: Лист №2, S6,0мм

Отбор проб провели АО «КазГАСА»

Место отбора: Лаборатория

Изготовитель: информация не предоставлена

Заявитель (адрес): АО «КазГАСА»

Дата изготовления продукции: информация не предоставлена.

Дата поступления продукции на испытания: 02.09.2019 г.

Дата проведения испытаний: 02.09.2019 г.-06.09.2019 г.

Количество образцов Фрагмент листа №2 Лист S6мм

НД на продукцию: Нормативный документ не предоставлен

Вид испытаний: Определение химического состава и механических свойств Вх.178/19

Наименование определяемых характеристик	НД на метод испытания	Нормапо НД для стали. Зсп ГОСТ 380-2005	Фактическое значение
1 Массовая доля углерода, (C), %,	ГОСТ 12344-88	0,14-0,22	0,17
2 Массовая доля кремния, (Si). %	ГОСТ 12346-78	0,15-0,30	0,23
3 Массовая доля марганца, (Mn). %	ГОСТ 12348-78	0,40-0,65	0,51
4 Массовая доля хрома, (Cr). %,	ГОСТ 12350-78	Не более 0,30	0,22
5 Массовая доля никеля, (Ni). %,	ГОСТ 12352-81	Не более 0,30	следы
6 Массовая доля серы, (S). %,	ГОСТ 12345-88	Не более 0,050	0,014
7 Массовая доля фосфора, (P). %,	ГОСТ 12347-77	Не более 0,040	0,018
8 Временное сопротивление разрыву, δ_b , Н/мм ² ,	ГОСТ 1497-84	370-480	435,4
9 Относительное удлинение, %,		23-26	10
10 Предел текучести, $\delta_{т1}$, Н/мм ²		205-245-	339,7

Примечание: Ближайшим аналогом марки стали, из которой изготовлен стальной лист S6,0 мм является сталь Зсп ГОСТ 380-2005 «Сталь углеродистая .обькновненного качества.

Марки»

Главный специалист
Начальник ИЛ
Начальник ИЦ

Росина Т.А.
Юровский А.В.
Валуцкая Н.И.

Протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.

Протокол не может быть полностью или частично воспроизведен или распространен без разрешения Испытательного центра.

00012162

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Сертификат о поверке динамометра электронного АЦД/1С-2000/5И-1

ВНИМАНИЕ! При работе с универсальными динамометрами при переходе с одного вида нагрузки на другую (с растяжения на сжатие и наоборот) необходимо создать предварительное усилие, значение которого не меньше измеряемого. Возможные неисправности и методы их устранения приведены в таблице 6

Таблица 6

Неисправность	Вероятная причина	Метод устранения
Динамометр включен в сеть: не работает индикация.	Отсутствует напряжение в сети питания.	Проверить напряжение в розетке электрической сети 220 В.
Динамометр включен в сеть: индикатор не реагирует на изменение нагрузки.	Обрыв соединительного кабеля.	Проверить соединительный кабель.
Показания нестабильны	Помехи по сети электропитания, от работающего оборудования или вибрации.	Проверить кабель, проверить разъем. Устранить помехи. Устранить вибрации.

При появлении других признаков неисправности обращайтесь в центры технического обслуживания.

4. Описание интерфейса

Для подключения к компьютеру электронный блок динамометра оснащен последовательным интерфейсом RS-232. Команды интерфейса связи RS232 не оказывают недопустимого влияния на метрологически значимую часть ПО и результаты измерений. Длина линии связи не должна превышать 5 метров.

10

5. Свидетельство о приемке

Динамометр электронный АЦД/1С-2000/5И-1, класс 1 заводской номер 5522, соответствует ТУ 26.51.66.112-026-67392736-2017 и признан годным для эксплуатации.

Дата изготовления «12» ноября 2018 г.

Контролер ОТК С. Никитин

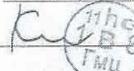


6. Заключение о поверке

Динамометр электронный АЦД/1С-2000/5И-1, заводской номер 5522 на основании результатов первичной поверки признан годным и допущен к применению.

Дата поверки «19» ноября 2018 г.

Поверитель С. Никитин



7. Электронное клеймо

При каждом новом включении динамометра в сеть после прохождения теста высвечивается калибровочное число. При первичной поверке значение этого числа заносится в таблицу 7. При изменении калибровочных параметров меняется калибровочное число, в этом случае необходимо произвести периодическую поверку динамометра, а новое калибровочное число занести в таблицу 7.

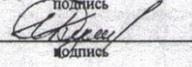
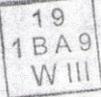
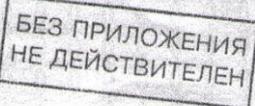
Таблица 7

Калибровочное число	Дата поверки
<u>CAL 2</u>	<u>19.11.2018</u>

11

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Сертификат о калибровке Манометра деформационного образцового МО №53106

		
При повторной поверке предъявление сертификата к поверке обязательно		
	Выдан: Алматинский филиал АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» г. Алматы пр. Алтынсарина, 83 тел. 303-90-97, KZ.K.02.1298 полное наименование организации адрес, телефон, факс, номер аттестата аккредитации	
KZ.K.02.1298	Сертификат о калибровке № ВА 04-01-01011	
Владелец средства измерений:	АО Казахская Головная Архитектурно-Строительная Академия (АО КазГАСА)	
полное наименование организации, адрес, телефон, факс		
Наименование средства измерений:	Манометр деформационный образцовый МО; №53106	
тип, заводской номер, регистрационный номер		
Метрологические характеристика средства измерений:	Диапазон измерения: от 0 до 400 кгс/см ²	
Условия калибровки:	$t_{OKP} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность 78 %, $P_{атм} = 91,5 \text{ кПа}$ температура, влажность, давление и др. влияющие величины	
Методика калибровки:	МК АФ АО 392049020062.04.005-2007	
Результаты калибровки:	максимальное отклонение $\pm 0,4\%$	
Неопределенность измерений:	расширенная неопределенность 0,23% при $k=2$; $p=0,95$ указать значение расширенной неопределенности	
Дополнительная информация:	ремонт средств измерений, один год рекомендуемый межкалибровочный интервал по требованию заказчика и т.д.	
Дата калибровки:	02.09.2019г.	
Дата проведения следующей калибровки:	02.09.2020 г.	
Руководитель калибровочной лаборатории	 ПОДПИСЬ	Карахожаев Ж.Ш. ФИО
калибровщик	 ПОДПИСЬ	Кушекбаев И.Д. ФИО
		

ПРИЛОЖЕНИЕ О

Сертификат о поверке прогибомеров ПСК-МКГ4



Алматинский филиал АО "НаЦЭКС"
(наименование подразделения государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица)
Аттестат аккредитации №KZ.P.02.0687 от 04.05.2015 г.
(номер аттестата аккредитации)

KZ.P.02.0687

СЕРТИФИКАТ О ПОВЕРКЕ № BA-01-02-13648

Прогибомер

наименование средства измерений (эталона)

Тип, обозначение: ПСК-МКГ4

заводской № 460

(0-100)мм ц.д. 0,1 мм

(диапазон измерений средства измерений)

Изготовитель: завод ООО СКБ "Стройприбор" г.Челябинск

Дата изготовления: 2018г.

Пользователь: АО "Казахский НИ и проектный институт строительства и архитектуры"

Поверка проведена в соответствии: (наименование и адрес)

KZ.04.02.08859-2014 Раздел 4 "МП Прогибомеры ПСК-МКГ4" РЭ.КБСП.427351.039

(обозначение и наименование методики поверки)

с использованием следующих средств поверки: спец.приспособление,

- ШЦЦ; МК; весы ВНЦ-2 №19810; набор МКП № 820548

(обозначение эталона и вспомогательного оборудования, использованного при поверке)

На основании результатов поверки средство измерений (эталон) признано годным и допущено к применению по классу -, разряду -

с учетом неопределенности измерений Ur = +/- 0,01мм при (k=2, P=0.95)

Дата поверки " 22 "Июля" 2019 г. Действителен до " 22 "Июля" 2020 г.

Руководитель отдела (лаборатории)

подпись

Г.А.Сарсенбин

инициалы, фамилия

Оттиск
поверительного
клейма

Поверитель

подпись

Г.Н.Бекбергенова

инициалы, фамилия

СЛ 18 : 0277048

ДКП: 052.ТЛ.ВА.ВА





Алматинский филиал АО "НаЦЭКС"
(наименование подразделения государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица)
Аттестат аккредитации №KZ.P.02.0687.от 04.05.2015 г.
(номер аттестата аккредитации)

KZ.P.02.0687

СЕРТИФИКАТ О ПОВЕРКЕ № ВА-01-02-13642

Прогибомер

наименование средства измерений (эталона)

Тип, обозначение: ПСК-МГ4

заводской № 440

(0-100)мм ц.д. 0,1 мм

(диапазон измерений средства измерений)

Изготовитель: завод ООО СКБ "Стройприбор" г.Челябинск

Дата изготовления: 2018г.

Пользователь: АО "Казахский НИ и проектный институт строительства и архитектуры"

Поверка проведена в соответствии: (наименование и адрес)

KZ.04.02.08859-2014 Раздел 4 "МП Прогибомеры ПСК-МГ4" РЭ.КБСП.427351.039

(обозначение и наименование методики поверки)

с использованием следующих средств поверки: спец.приспособление,

ШЦЦ; МК; весы ВНЦ-2 №19810; набор МКП № 820548

(обозначение эталона и вспомогательного оборудования, использованного при поверке)

На основании результатов поверки средство измерений (эталон) признано годным и допущено к применению по классу -, разряду -

с учетом неопределенности измерений

Ur = +/- 0,01мм при (k=2, P=0.95)

Дата поверки " 22 " Июля 2019 г. Действителен до " 22 " Июля 2020 г.

Руководитель отдела (лаборатории)

подпись

Г.А.Сарсенбин

инициалы, фамилия

Оттиск поверительного клейма

Поверитель

подпись

Г.Н.Бекбергенова

инициалы, фамилия

СЛ 18 : 0277042

ДКП: 052.ТЛ.ВА.ВА





KZ.P.02.0687

Алматинский филиал АО "НаЦЭКС"
(наименование подразделения государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица)
Аттестат аккредитации №KZ.P.02.0687.от 04.05.2015 г.
(номер аттестата аккредитации)

СЕРТИФИКАТ О ПОВЕРКЕ № ВА-01-02-13644

Прогибомер

наименование средства измерений (эталона)

Тип, обозначение: ПСК-МГ4

заводской № 450

(0-100)мм ц.д. 0,1 мм

(диапазон измерений средства измерений)

Изготовитель: завод ООО СКБ "Стройприбор" г.Челябинск

Дата изготовления: 2018г.

Пользователь: АО "Казахский НИ и проектный институт строительства и архитектуры"

Поверка проведена в соответствии: (наименование и адрес)

KZ.04.02.08859-2014 Раздел 4 "МП Прогибомеры ПСК-МГ4" РЭ.КБСП.427351.039

(обозначение и наименование методики поверки)

с использованием следующих средств поверки: спец.приспособление,

ШЦЦ; МК; весы ВНЦ-2 №19810; набор МКП № 820548

(обозначение эталона и вспомогательного оборудования, использованного при поверке)

На основании результатов поверки средство измерений (эталон) признано годным и допущено к применению по классу -, разряду -

с учетом неопределенности измерений

Ur = +/- 0,01мм при (k=2, P=0.95)

Дата поверки " 22 "Июля" 2019 г. Действителен до " 22 "Июля" 2020 г.

Руководитель отдела (лаборатории)

подпись

Г.А.Сарсенбин

инициалы, фамилия

Оттиск поверительного клейма

Поверитель

подпись

Г.Н.Бекбергенова

инициалы, фамилия

СЛ 18 : 0277044

ДКП: 052.ТЛ.ВА.ВА





Алматинский филиал АО "НаЦЭКС"
(наименование подразделения государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица)
Аттестат аккредитации №KZ.P.02.0687.от 04.05.2015 г.
(номер аттестата аккредитации)

KZ.P.02.0687

СЕРТИФИКАТ О ПОВЕРКЕ № ВА-01-02-13643

Прогибомер

наименование средства измерений (эталоны)
Тип, обозначение: ПСК-МГ4 заводской № 449

(0-100)мм ц.д. 0,1 мм

(диапазон измерений средства измерений)

Изготовитель: завод ООО СКБ "Стройприбор" г.Челябинск

Дата изготовления: 2018г.

Пользователь: АО "Казахский НИ и проектный институт строительства и архитектуры"

Поверка проведена в соответствии: (наименование и адрес)

KZ.04.02.08859-2014 Раздел 4 "МП Прогибомеры ПСК-МГ4" РЭ.КБСП.427351.039

(обозначение и наименование методики поверки)

с использованием следующих средств поверки: спец.приспособление,

ШЦЦ; МК; весы ВНЦ-2 №19810; набор МКП № 820548

(обозначение эталона и вспомогательного оборудования, использованного при поверке)

На основании результатов поверки средство измерений (эталон) признано годным и допущено к применению по классу -, разряду -

с учетом неопределенности измерений Ur = +/- 0,01мм при (k=2, P=0.95)

Дата поверки " 22 "Июля" 2019 г. Действителен до " 22 "Июля" 2020 г.

Руководитель отдела (лаборатории)

подпись

Г.А.Сарсенбин

инициалы, фамилия

Оттиск поверительного клейма

Поверитель

подпись

Г.Н.Бекбергенова

инициалы, фамилия

СЛ 18 : 0277043

ДКП: 052.ТЛ.ВА.ВА





Алматинский филиал АО "НаЦЭКС"
(наименование подразделения государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица)
Аттестат аккредитации №KZ.P.02.0687.от 04.05.2015 г.
(номер аттестата аккредитации)

KZ.P.02.0687

СЕРТИФИКАТ О ПОВЕРКЕ № ВА-01-02-13641

Прогибомер

наименование средства измерений (эталона)

Тип, обозначение: ПСК-МГ4

заводской № 439

(0-100)мм ц.д. 0,1 мм

(диапазон измерений средства измерений)

Изготовитель: завод ООО СКБ "Стройприбор" г.Челябинск

Дата изготовления: 2018г.

Пользователь: АО "Казахский НИ и проектный институт строительства и архитектуры"

Поверка проведена в соответствии: (наименование и адрес)

KZ.04.02.08859-2014 Раздел 4 "МП Прогибомеры ПСК-МГ4" РЭ.КБСП.427351.039

(обозначение и наименование методики поверки)

с использованием следующих средств поверки: спец.приспособление,

ШЦЦ; МК; весы ВНЦ-2 №19810; набор МКП № 820548

(обозначение эталона и вспомогательного оборудования, использованного при поверке)

На основании результатов поверки средство измерений (эталон) признано годным и допущено к применению по классу -, разряду -

с учетом неопределенности измерений Ur = +/- 0,01мм при (k=2, P=0.95)

Дата поверки " 22 " Июля 2019 г. Действителен до " 22 " Июля 2020 г.

Руководитель отдела (лаборатории)


подпись

Г.А.Сарсенбин

инициалы, фамилия

Оттиск поверительного клейма

Поверитель


подпись

Г.Н.Бекбергенава

инициалы, фамилия

СЛ 18 : 0277041

ДКП: 052.ТЛ.ВА.ВА

