

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D072900 «Строительство»

Брянцева Александра Александровича на тему: «Совершенствование конструктивных решений и методов расчета сварных двутавровых балок с гофрированными стенками, ослабленных технологическими отверстиями»

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 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 требованиям Еврокодов определена классификация поперечного сечения балки с гофрированной стенкой.
3. Определен оптимальный шаг расположения отверстий и диаметр отверстия.
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 усовершенствовано 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 диссертации.

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 стеками 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 восемь статей опубликованы в научных и научно–практических изданиях, включенных в Перечень рекомендуемых ККСОН МОН РК; пять статей в материалах международных конференций; четыре статьи 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 страницы.

В первой главе рассматриваются вопросы области применения гофрированных конструкций при строительстве зданий и сооружений. Исследован опыт экспериментально-теоретических исследований металлических конструкций с гофрированной стенкой, как на территории нашей республики, так и за ее пределами. Выполнен анализ результатов испытаний гофрированных стенок двутавровых балок, в том числе ослабленных отверстиями на прочность и устойчивость.

Основные выводы по первой главе:

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.

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.

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.

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 вблизи данных отверстий и на прогиб балок проводятся также в ограниченном количестве.

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.

Во второй главе рассмотрены вопросы оценки несущей способности и существующие методы расчета гофрированных двутавровых балок.

Рассмотрены существующие методы расчета элементов двутаврового сечения с поперечно-гофрированной стенкой на прочность, на местную и общую устойчивость. Исследованы варианты проектирования с учетом требований СН РК EN 1993–1–5:2006/2011. Изучен опыт расчета балок с гофрированной стенкой в казахстанских строительных нормах.

Основные выводы по второй главе:

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 расположение отверстия относительно высоты стенки.

Исследовано влияние отверстий на напряженно–деформированное состояние конструкции, которое 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.

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.

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 $\frac{f}{a}$.

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.

В третьей главе было проведено теоретическое исследование гофрированных стенок с различным очертанием гофр и их параметров. Исследованы более 60 вариантов различных гофрированных сечений. Влияние параметров гофров на их устойчивость представлено в виде фактического момента инерции на 1 кг массы стали гофрированной стенки. Прошу обратить внимание на полученные интереснейшие данные относительно эквивалентных толщин плоских стенок, той же устойчивости что у гофрированных. Влияние параметров гофров на их прочность, представлено на графиках в виде фактического момента сопротивления на 1 кг массы стали гофрированной стенки. Определен расход стали, как один из главных показателей экономической эффективности балок с гофрированными стенками. Предложен метод расчета гофрированных конструкций по требованиям новых стандартов.

Основные выводы по третьей главе:

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.

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

В четвертой главе было проведено математическое моделирование конструктивных решений сварных двутавровых балок, ослабленных отверстиями. Для определения наиболее эффективного шага и диаметра отверстий исследовано 56 моделей балок с двумя и тремя отверстиями с идентичными характеристиками. Также исследовались эффективные способы усиления круглых отверстий. Определено эффективное расположение отверстий по высоте гофрированной стенки.

Основные выводы по четвертой главе:

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.

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 $0,5h_w$.

Определено влияние толщины окаймления и парных вертикальных ребер жёсткости 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, усиленных окаймлением различной толщины и ширины, ребрами жесткости, было выявлено уменьшение прогиба моделей балок по сравнению с моделями без усиления отверстий.

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.

Эффективнее использовать окаймление по площади равное площади отверстия.

Исследовано влияние расположения отверстия по высоте гофрированной стенки на прогиб балки с усиленными отверстиями. Определено, что с диаметром отверстия $0,5h_w$ при шаге отверстий $2d$, $3d$ и $4d$, во всех трех случаях, эффективнее размещение отверстия в центре гофрированной стенки.

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%.

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%.

В пятой главе приведены результаты испытания 5 моделей балок с гофрированными стенками, ослабленных двумя технологическими отверстиями, спроектированным по наиболее эффективным параметрам, полученным по результатам диссертационной работы.

Основные выводы по пятой главе:

Предельная экспериментальная нагрузка всегда была выше расчетной для всех типов балок с гофрированной стенкой, что говорит о высокой надежности всех элементов конструкций.

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.

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%.

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.

Александр Александрович Брянцевтің 6D072900 «Құрылыс» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін «Технологиялық саңылаулардан әлсіреген гофрленген қабырғалары бар дәнекерленген қос таврлы арқалықтарды есептеудің әдістері мен сындарлы шешімдерді жетілдіру» тақырыбындағы диссертациясының

АННОТАЦИЯСЫ

Тақырыптың өзектілігі

Гимараттар және құрастырылымдардың негізгі болат қаңқаларының беріктігін арттыратын факторлардың бірі – құрастырылым формаларын дұрыс таңдау, ал ол пластикалық жұмыс болаттың есебінен барлық элементтерінің сыртқы әсерлердің энергияларын сіңіріп алу қасиетіне, атап айтқанда негізінен қабырғалары тұрақтылығының қамтамасыз етілуіне байланысты болып келетін екі таврлы қималы арқалықтардың серпімді пластикалық сатыларда болуы мүмкін шамадан тыс жұмыс жасай алу қабілетіне байланысты болады.

Екі таврлы қималы арқалықтар айныма таңбалы циклді жүктеме жағдайларында және қабырғалары тегіс емес, гофрленген болған кездегі жіңішке қабырғаларды қолдану жағдайларында ұзақ уақыт бойы едәуір шамадан тыс жұмыс жасай алады. Гофрлендіру минималды қалыңдықта қабырғалардың тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Сондықтан да аса сейсмикалық төзімді, материалдарды аз қажетсінетін және антисейсмикалық іс-шараларға ауқымды шығындарды талап етпейтін жаңа құрастырылымдық формаларды және гофрленген қабырғалары бар, соның ішінде саңылаулармен әлсіреген арқалықтарды есептеу әдістерін әзірлеу маңызды мақсат болып табылады.

Қазіргі уақытта қазақстандық және шетелдік нормативтік дереккөздерде гофрленген қабырғалар саңылауларын күшейтудің бір нұсқасы ғана ұсынылғандықтан, жаңа әдістерді әзірлеу және дөңгелек саңылауларды күшейтудің және есептеудің қолданыстағы әдістерді жетілдіру мәселесі өзекті болып келеді.

Сан алуан геометриялық параметрлері бар және дөңгелек технологиялық саңылаулармен әлсіреген, әртүрлі диаметрлі және қабырғалардың ұзындығы мен биіктігі де әртүрлі гофрлардың үшбұрышты кескіні бар көлденең гофрленген қабырғалы арқалықтар **диссертациялық зерттеудің нысаны** болып табылады.

Технологиялық саңылаудың қадамы мен диаметрінің гофрленген қабырғалы пісірілген арқалықтың деформациялылығына ықпал етуін анықтау, гофрлардың және олардың кескіндерінің оптималды параметрлерін айқындау, технологиялық саңылауларды күшейтудің құрастырылымдық шешімдерін және гофрленген қабырғалы арқалықтарды есептеу әдістерін жетілдіру – **диссертациялық зерттеудің мәні** болып табылады.

Зерттеудің мақсаты:

Гофрленген қабырғалары бар пісірілген екі таврлы арқалықтарды, саңылауларды күшейтудің тәсілдерін және оларды есептеу әдістерін жетілдіру үшін гофрлер мен оның параметрлерінің анағұрлым оптималды және тиімді кескіндерін, диаметрлерін және гофрленген қабырғалар бойынша ұзындығы мен биіктігі саңылауларының қадамдарын анықтау.

Зерттеудің міндеттері:

1. Гофрлердің сан алуан кескіндерімен гофрленген қабырғалы арқалықтардың қолдану саласын зерделеу.

2. Жергілікті және шетел нормативтік дереккөздерде көрсетілген гофрленген қабырғалары бар арқалықтарды есептеудің қолданыстағы әдістерін зерттеу.

3. Қималары және гофр параметрлері әртүрлі болып келетін гофрленген қабырғалы пісірілген арқалықтардың жұмыс тиімділігін зерттеу.

4. Көлденең гофрленген қабырғалы, әртүрлі кескінді және параметрлі арқалықтарды пайдаланудың тиімділігін дәлелдеу және оның олардың тұрақтылығы мен беріктігіне әсерін анықтау.

5. Арқалық қабырғасының ұзындығы мен биіктігі бойынша саңылаулардың анағұрлым оптималды қадамын және саңылау диаметрін анықтау.

6. Технологиялық саңылауларды күшейту бойынша әртүрлі құрастырылымдық шешімдердің гофрленген арқалықтарға ықпал етуін анықтау.

7. Технологиялық саңылауларды күшейту бойынша әртүрлі құрастырылымдық шешімдерді жетілдіру.

8. Саңылаулары бар және саңылаулары жоқ гофрленген қабырғалы арқалықтардың тәжірибелік модельдердің зертханалық сынауларын өткізу.

9. Саңылауларды қосымша күшейтудің тиімді әдісін анықтау бойынша бірфакторлы дисперсиялық талдау әдісімен сандық тәжірибелік зерттеуді орындау.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы:

1. Қабырғаларының қалыңдығы 2 мм-ден 10 мм-ге дейін келетін үшбұрышты кескінді гофрлердің тиімді параметрлері анықталды.

2. Еврокодтың талаптарына сәйкес гофрленген қабырғалы көлденең қималы арқалықтың жіктеуіші анықталды.

3. Саңылаулар мен саңылау диаметрлері орналасуының оптималды қадамы анықталды.

4. Қысылған немесе созылған белбеуге қатысты қабырғаның биіктігі бойынша саңылау орналасуының оптималды орны анықталды.

5. Технологиялық саңылауларды күшейтудің әртүрлі нұсқаларының гофрленген қабырғалы арқалықтың деформациялылығына әсер етуі зерттелді.

6. Құрама әдіспен саңылауы бар және саңылауы жоқ гофрленген қабырғалы пісірілген арқалықтың теориялық есебі орындалды, сондай-ақ

осыған ұқсас құрастырылымдарды есептеу үшін бағдарламалық кешен таңдалды.

7. Гофрленген қабырғадағы технологиялық саңылауды күшейтудің құрастырылымдық шешімі зерттеліп, жетілдірілді.

Зерттеулер нәтижелерін енгізу

Диссертациялық зерттеудің нәтижелері көтеруші құрылымдар технологиялық саңылаулармен әлсіреген гофрленген қабырғалы пісірілген металды арқалықтардан орындалатын ғимараттар мен құрылымдарды жобалау кезінде жобалық институтпен пайдаланылады, сондай-ақ жұмыс нәтижелері КМ сатысындағы көтеруші металды құрылымдарды жобалау кезінде пайдаланды. 2019 жылғы 2 қыркүйектегі №01-58 Енгізу актісі диссертацияның А қосымшасында көрсетіледі, ал нысанның фотосуреттері Б қосымшасында берілген. Сондай-ақ диссертациялық зерттеудің нәтижелері оқу үрдісіне де енгізілді. 2019 жылғы 10 қыркүйектегі №10-03/696 Енгізу актісі диссертацияның В қосымшасында көрсетілген.

Нәтижелер сенімділігі

Алынған нәтижелердің, қорытындылардың және ұсыныстардың сенімділігі жіңішке қабырғалы біліктердің, деформацияланатын қатты денелер механикасының, құрылыс құрылымдары мен пластиналар тұрақтылығының теорияларында, сондай-ақ компьютерлік модельдеу үлгілерінде және болмыстық тәжірибелерде негізделеді. Гофрленген қабырғалы арқалықтардың жетілдірілген модельдеріне пайдалы модельдердің патенті алынды (Г және Д қосымшалары).

Жұмыстың апробациясы

Диссертациялық зерттеудің нәтижелері талқыланды:

– халықаралық «Заманауи қоғамдағы өзекті ғылыми зерттеулер» ғылыми-практикалық конференцияда (Переяслав–Хмельницкий қ., 2016 ж.);

– халықаралық «Құрылыс дамуының өзекті проблемалары мен перспективалары: инновациялар, жаңғырту және энергиялық тиімділік» ғылыми-практикалық конференцияда (Алматы қ., 2017 ж.);

– халықаралық «Құрылыстағы ғылым және инновациялар» ғылыми–практикалық конференцияда (Белгород қ., 2018 ж.);

– халықаралық «Сәулет пен құрылыстағы заманауи трендтер: энергиялық тиімділік, энергиялық үнемдеу, BIM технологиялары, қалалық ортаның проблемалары» ғылыми–практикалық конференцияда (Алматы қ., 2019 жылғы 12 сәуір);

– «Гофрленген арқалықтар. Заманауи күйі және даму тенденциялары» атты дөңгелек үстелде (Мәскеу қ., 2019 ж.);

– «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019)» халықаралық ғылыми конференцияда (Санкт – Петербург қ., 2019 ж.).

– Халықаралық білім беру корпорациясының (ХБК) Жалпы құрылыс факультетінің 2019 жылғы кеңейтілген отырысында.

Жарияланымдар:

Диссертацияның тақырыбы бойынша барлығы 17 жұмыс, соның ішінде сегіз мақала ҚР БЖҒМ БҒБК-мен ұсынылған Тізімдемеге енген ғылыми және ғылыми-практикалық басылымдарда; бес мақала халықаралық конференциялар материалдарында; төрт мақала рецензияланатын халықаралық ғылыми журналдар мен конференцияларда, соның ішінде бір мақала құрылыс бойынша процентилі 84 және CiteScore 2,75 болып келетін Scopus деректер базасында индекстелетін журналда жарық көрді.

Жұмыстың құрамы және көлемі:

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, бес бөлімнен, қорытындыдан және қосымшалардан тұрады. Жұмыстың көлемі машинамен басылған мәтіннің 149 парағынан және 52 кестеден, 89 суреттен, 157 атаудан тұратын пайдаланған әдебиеттер тізімінен және көлемі 56 парақтан келетін 13 қосымшадан тұрады.

Бірінші бөлімде ғимараттар мен құрылымдардың құрылысы кезінде гофрленген құралымдарды қолдану саласының мәселелері қарастырылады. Гофрленген қабырғалы металды құралымдардың біздің республика аумағында да, одан тыс аумақтарда да тәжірибелік-теориялық зерттеулердің тәжірибелері зерттелді. Екі таврлы гофрленген қабырғалы, соның ішінде технологиялық саңылаулармен әлсіреген арқалықтардың тұрақтылығын және беріктігін сынау нәтижелеріне талдау орындалды.

Бірінші бөлім бойынша негізгі қорытынды:

18 ғасырдың аяғында қоршау деп аталған гофрленген құралымдар кеме құрылысында, ал 1920 жылдардың соңынан бастап пісіру жұмыстарын пайдалана бастағаннан кейін бұл салада да кеңінен қолданыла бастайды.

1950 жылдардан бастап сан алуан кескінді гофрлармен гофрленген құралымдар Еуропада да, Америкада да көпірлерді, эстакадаларды, автостардтарды салған кезде кеңінен пайдалана бастайды. Жапонияда көпірлердің құрылысында гофрленген құралымдар 1980 жылдан бастап қана қолданыла бастады, бірақ 50-ден астам көпір салынды. Ал Қытай гофрленген құралымдарды 1990 жылдардан бастап пайдалана бастады. Ал Қазақстан Республикасының аумағында алғашқы көпір 2011 жылы ғана пайдалануға берілді. Бүгінгі күнде гофрленген құралымдарды пайдалана отыра 10 көпір салынды.

Қазақстанның аумағында үшбұрышты кескінді болып келетін гофрлар кеңінен таралған. Мәселен, Еуропа елдерінде гофрлардың толқынды нысанын пайдаланады, ал Жапония мен АҚШ-та – трапеция және тікбұрыштылар пайдаланылады.

Гофрленген арқалықтардың қабырғаларындағы саңылаулардың иіліс кезінде көтеруші қабілетіне ықпал етуді зерттеу бойынша жұмыстар шектеулі. Гофрленген арқалықтардың қабырғаларындағы саңылаулардың осы саңылауларға жақын кернеулердің концентрациясына және арқалықтардың иілуіне ықпал етуін зерттеулер де шектеулі.

Қазақстан Республикасының аумағында ғимараттар мен құрастырылымдардың құрылысында гофрленген құралымдарды жаппай

пайдалануды енгізу үшін гофрленген қабырғалы, соның ішінде саңылаулармен әлсіреген арқалықтардың теориялық және тәжірибелік зерттеулерін толық масштабты өткізу қажет.

Екінші бөлімде гофрленген екі таврлы арқалықтардың көтеруші қабілетінің бағасы мен оларды есептеудің қолданыстағы әдістері мәселелері қарастырылған. Көлденең гофрленген қабырғалы екі таврлы қималы элементтердің беріктігін, жергілікті және жалпы тұрақтылығын есептеудің қолданыстағы әдісі қарастырылды. СН РК EN 1993–1–5:2006/2011 талаптарын ескере отыра, жобалау нұсқалары зерттелді. Гофрленген қабырғалы арқалықтарды қазақстандық құрылыс нормаларында есептеу тәжірибесі зерделенді.

Екінші бөлім бойынша негізгі қорытындылар:

Гофрленген қабырғалы, саңылаулармен әлсіреген арқалықтардың көтеруші қабілетіне әсер ететін негізгі факторлар мыналар: арқалықтағы саңылау, арқалық қабырғасындағы саңылаудың қадамы, саңылаудың кескіні, қабырғаның иілгіштігі, сондай-ақ саңылаудың қабырғаның биіктігіне байланысты орналасқан жері.

Саңылаулардың теориялық тұрғыдан да, тәжірибелік тұрғыдан да үлке рөл атқаратын құралымның кернеулі-деформацияланған күйіне әсер етуі зерттелді. Концентрацияның коэффициенті болып сипатталатын кернеулердің концентрациясы – саңылаулармен әлсіреген гофрленген құралымдарды жобалаушылармен ұдайы шешуге тырысатын жергілікті кернеулерді барынша азайту бойынша басты мәселесі.

Арқалық қабырғасында саңылауларды орындаған кезде оның көтеруші қабілетінің әлсіреуі болады, егер де иілу сәтінен басқа көлденең күші де болған жағдайда көтеруші қабілетін одан әрі төмендетеді.

Есептеудің еуропалық әдісіне сәйкес тұрақтылықты жоғалту ықтималдығы азайған, шектік кернеуі есептік қарсылығынан 60-тен 85%-ға дейін болады, ал есептеудің ресейлік әдісі бойынша гофрдің бірдей $\frac{f}{a}$ параметрлерін есепке ала отыра, 30 – 60% құрайды.

Гофрленген құраалымдардың еуропалық ғалымдар ұсынатын және қолданатын есептеу әдістері біздің республика аумағында қабылданған нормалар бойынша есептеумен салыстырғанда көтеруші қабілетін бұрылысқа 20–30%-ға дейін ұлғайтады.

Үшінші бөлімде сан алуан гофр кскіндері мен параметрлерімен гофрленген қабырғалардың теориялық зерттеуі жүргізілді. Әртүрлі гофрленген қималардың 60 астам нұсқалары зерттелді. Гофрлер параметрлерінің оның тұрақтығына ықпал етуі гофрленген қабырға болатының 1 кг салмағына инерцияның нақты сәті түрінде ұсынылған. Гофрленгенмен тұрақтылығы ұқсас келетін тегіс қабырғалардың эквивалентті қалыңдығына қатысты алынған қызықты деректерге назар аударуды сұраймын. Гофрлар параметрлерінің оның беріктігіне ықпал етуі гофрленген қабырға болатының 1 кг салмағына қарсылықтың нақты сәті түрінде кестеде берілген. Гофрленген қабырғалы арқалықтардың

экономикалық тиімділігін басты көрсеткіштерінің бірі болып табылатын болаттың шығыны анықталды. Жаңа сатандарттардың талаптарына сәйкес гофрленген құралымдарды есептеудің әдісі ұсынылды.

Үшінші бөлім бойынша негізі қорытындылар:

Жалпы қалыңдығы әртүрлі гофрленген қабырғалар үшін алынған Sin деректерінің детальді салыстырма талдауы кезінде арқалықтар және ГҚ Қазақстан тұрақтылығын арттыру үшін келесі параметрлі гофрлар ГҚ Қазақстан арқалықтарының анағұрлым тиімді келесі параметрлері:

- Қалыңдығы 2 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 280×45×2/30;
- Қалыңдығы 3 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 140×45×3/5 t_w ;
- Қалыңдығы 4 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 480×80×4/30;
- Қалыңдығы 5 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 480×80×5/30;
- Қалыңдығы 6 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 480×80×6/30;
- Қалыңдығы 8 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 480×80×8/30;
- Қалыңдығы 10 мм гофрленген қабырға үшін – ГҚ Қаз 480×80×10/30.

Гофрленген құралымдарды есептеудің қолданыстағы әдісін жетілдіру үшін гофрленген арқалықтардың қима сыныбы әзірленді. Қысылу жағдайында, егер де қабырға 1 сыныбы бойынша жіктелген және полкасы 1 сыныпты болса, жалпы көлденең қимасы тиімді полкасымен және қабырғасымен 1 сыныпты қима ретінде жіктелетін болады. Ал иілу жағдайларында қабырғасы сыныпты болып жіктелген болса, ал полкалары да дәл солай 1 сыныпты болса, жалпы көлденең қимасы тиімді полкасымен және қабырғасымен 1 сыныпты қима ретінде жіктелетін болады.

Төртінші бөлімде саңылаулармен әлсіреген пісірілген екі таврлы арқалықтардың құралымдық шешімдерін математикалық модельдеуі жүргізілді. Саңылаулардың тиімді қадамдары мен диаметрлерін анықтау үшін сипаттамалары ұқсас екі және үш саңылаулары бар арқалықтардың 56 моделі зерттелді. Сондай-ақ дөңгелек саңылауларды күшейтудің тиімді әдістері де зерттелді. Гофрленген қабырғаның биіктігі бойынша саңылаулардың тиімді орналасу орны айқындалды.

Төртінші бөлім бойынша негізгі қорытындылар:

Үш саңылау үшін алынған мәлімет көмкерілген және параллель орналасқан қатайту қабырғалармен күшейтілген саңылаулардың $2d$ қадамымен және саңылаулардың $0,25h_w$ және $0,5h_w$ диаметрлерімен гофрленген қабырғада орналасу тиімді екенін көрсетті.

Екі саңылау үшін алынған мәлімет көмкерілген және параллель орналасқан қатайту қабырғалармен күшейтілген саңылаулардың $2d$ және $3d$ қадамымен және саңылаулардың $0,25h_w$, $0,5h_w$ и $0,75h_w$ диаметрлерімен, ал саңылаудың $0,25h_w$ және $0,5h_w$ диаметрлері үшін ғана саңылаудың $4d$ қадамымен гофрленген қабырғада орналасу тиімді екенін көрсетті.

Көмкерілу қалыңдығының және әртүрлі қалыңдықты көмкерілудегі жұп тігінен қатайту қабырғаларының саңылаулары бар гофрленген қабырғалы арқалықтар моделінің жұмысына деген әсері анықталды. Сондай-ақ сыртқы қырының иілуінің саңылаулары бар гофрленген қабырғалы арқалықтар моделінің көтеруші қабілетіне ықпал етуі де анықталды. Қалыңдығы және ені

эртүрлі көмкерілумен, қатайту қабырғаларымен күшейтілген саңылаулары бар арқалықтардың барлық модельдерінде саңылаулары күшейтілмеген модельдермен салыстырғанда иілудің азайғаны анықталды.

Диаметрі $0,25h_w$ қадамы $2d$ саңылаулары үшін көмкерілудің және қатайту қабырғаларының анағұрлым тиімді қалыңдығы 2-ден 4 мм-ге дейін; диаметрі $0,5h_w$ және қадамы $2d$ үшін – 4-тен 6 мм-ге дейін; диаметрі $0,75h_w$ және қадамы $2d$ үшін – 6-дан 8 мм-ге дейін.

Саңылаудың аумағына тең келетін аумақты көмкерілуді пайдалану тиімдірек болып келеді.

Гофрленген қабырғаның биіктігі бойынша саңылаудың орналасқан орнының саңылаулары күшейтілген арқалықтың иілуіне ықпал етуі зерттелді. Саңылаудың диаметрі $0,5h_w$ және қадамы $2d$, $3d$ және $4d$ болып келетін саңылауларда барлық үш жағдайда да саңылаудың гофрленген қабырғаның ортасында орналастырылуы тиімді болып келеді.

Саңылау диаметрі $0,5h_w$ және $0,75h_w$ қадамы $2d$, $3d$ және $4d$ болып келетін арқалықтар үшін саңылауларды көмкерумен және саңылау тұсындағы қабырғасын $2t_w$ қалыңдатумен бірге арқалықтардың майысуы саңылауы көмкерілумен ғана күшейтілген арқалықтарға қарағанда орташа есеппен 7%-дан 38,5%-ға дейін азаяды.

Саңылаулар диаметрі $0,5h_w$ және $0,75h_w$ қадамы $2d$, $3d$ және $4d$ арақалықтар үшін саңылауларды көмкерумен және саңылау тұсындағы қабырғасын $2t_w$ қалыңдатумен бірге арқалықтардың майысуы саңылауы көмкерілумен және жұп тігінен қатайту қабырғаларымен күшейтілген арқалықтарға қарағанда орташа есеппен 2,3%-дан 28,5%-ға дейін азаяды.

Бесінші бөлімде Екі технологиялық саңылаулары бар гофрленген қабырғалы, диссертациялық жұмыстың нәтижелері бойынша анағұрлым тиімді параметрлер бойынша жобаланған арқалықтардың 5 моделін сынаудың нәтижелері көрсетілген.

Бесінші бөлімнің негізгі қорытындылары:

Шекті тәжірибелік жүктемесі гофрленген қабырғалы арқалықтардың барлық түрлері үшін әрқашан есептелгеннен жоғары болды, ол құралымның барлық элементтерінің жоғары сенімділігін көрсетеді.

Арқалық модельдерінің көтеруші қабілетерін жоғалтуы келесі негізгі себептердің салдарынан мүмкін болды:

- саңылауға жанасатын гофр жазықтықтарының жергілікті тұрақтылығын жоғалтуы;
- қысылған жоғарғы белбеуінің жергілікті тұрақтылығын жоғалтуы;
- қабырғалар тұрақтылығын жалпы және жергілікті жоғалтуы;
- шектен тыс деформациялылығы;
- созылып кеткен төменгі белбеудің пластикалық деформациясының дамуы;
- қабырға жазықтығынан көмкерілудің июі.

Металдың жұмыс жасауының берік сатысындағы иілудің компьютерлік және тәжірибелік мәндердің арасындағы алшақтық зерттелген барлық

модельдер үшін 0,37-ден 5,5%-ға дейін құрайды, ол таңдалған есептеу бағдарламасының сенімділігін растайды. ГҚА-1 моделі үшін металдың жұмыс жасауының берік сатысындағы иілудің теориялық және тәжірибелік мәндердің арасындағы алшақтық 1,5% құрайды.

Жалпы алғанда жүргізілген сынаулар арқалықтардың құрылыстық биіктігі, оларды күшейтуге болаттың шығынын азайту және дайындаудың еңбек сыйымдылығын азайту шегіндегі қондырғыны жіберу бойынша технолог мамандардың талаптарын қанағаттандыру мақсатында саңылауларды күшейтудің оптималды әдістерін анықтау бойынша жүргізіліген тәжірибелік жұмыстар өзінің қажеттілігін және пайдалылығын көрсетті.

ABSTRACT

of doctoral dissertation (PhD) in the specialty 6D072900 «Civil Engineering» of Bryantsev Alexander Alexandrovich on the topic «Improving design solutions and calculation methods of welded I-beams with corrugated webs, weakened by technological corrugations»

Research actuality

One of the factors enhancing the buckling resistance of steel skeletons of buildings and structures is to choose the proper structural form. It mostly depends on the capability of all elements to absorb the energy of external influences by means of plastic behavior of steel. Especially it depends on the capability of, for example, I-beams to resist the possible abnormal loadings at the elastic-plastic stage, and this is basically influenced by the adequate webs stability.

The I-beams may resist the considerable loadings for a long period of time if consider the conditions of repeated alternate loadings and cases of use of thin webs (not plane but corrugated ones). The corrugation ensures the web stability at its minimal thickness.

Therefore, the important task consists in the development of new structural forms and approaches to design the I-beams with corrugated webs (weakened by the holes as well) which could be distinguished by the enhanced seismic resistance and low material consumption without the need for heavy expenses on seismic safety measures.

Whereas the single variant to strengthen the holes in the corrugated web was offered in the Kazakhstan and foreign references, the development of new and improvement of existing methods of round holes strengthening and design represent the relevant objective.

The object of thesis research covers the I-beams with transversally corrugated web that features V-shaped corrugations with different geometrical parameters and are weakened by the round temporary holes of various diameters and spacing along the length and height of the web.

The subject of thesis research is to determine the influence of spacing and diameter of temporary hole on the deformability of I-beam with the corrugated web, to specify the optimal parameters of corrugations and their shape, to improve the structural concepts for strengthening the temporary holes as well as approaches to design the beams with corrugated web.

The goal of research:

To determine the most optimal and effective shapes of corrugations and their parameters, diameter and spacing of holes along the length and height of corrugated web to improve the welded I-beams with the corrugated webs, as well as improve the methods of holes strengthening and their design.

Research objectives:

1. To study the application domain of beams with the corrugated webs that feature the different shapes of corrugation.

2. To study the available methods to design the beams with the corrugated webs described in the local and foreign references.

3. To study the working efficiency of welded beams with corrugated webs that feature the different cross-section and corrugation parameters.

4. To justify the efficiency of utilization of beams with the transversally corrugated web and corrugations featuring the different shapes and parameters as well as determine the influence of corrugations on the buckling resistance and reliability of beams.

5. To determine the most optimal spacing of holes along the length and height of beam web as well as hole diameter.

6. To determine the influence of different structural concepts that relate to the strengthening of temporary holes on the deformability of SIN-beam.

7. To improve the structural solutions for strengthening of temporary holes.

8. To carry out the laboratory tests of models of beams with the corrugated webs (both with and without holes).

9. To conduct the computational and experimental investigation by means of single-way analysis of variance to estimate the efficiency of holes strengthening method.

Scientific novelty of thesis research:

1. The effective parameters of V-shaped corrugations with the web thickness of 2-10 mm are determined.

2. The classification of cross-section of beam with the corrugated web is determined according to the requirements of Eurocodes.

3. The optimal holes spacing and diameters are defined.

4. The optimal location of hole along the web height is determined with due regard to relatively compressive or tensile flange.

5 The influence of different variants of temporary holes strengthening on the deformability of beam with the corrugated web is studied.

6. The theoretical calculation of design of welded beam with the corrugated web (either with or without the hole) is conducted by means of mixed method, and the software application for design calculation of similar constructions is selected.

7. The structural solution for strengthening of temporary hole in the corrugated web is studied and improved.

Results introduction

The design institute in the course of designing of buildings uses the results of doctoral dissertation and constructions, which load carrying structures, are made from the welded metal beams with corrugated webs weakened by the temporary holes. Moreover, the results of research are applied when designing the load carrying structures of the metal constructions. The introduction act No. 01-58 as of September 2, 2019 is attached to the doctoral dissertation as Appendix A, and site photos – as Appendix B. Additionally the results of doctoral dissertation were applied in the course of educational process. The introduction act No. 10-03/696 as of September 10, 2019 is attached to the doctoral dissertation as Appendix C.

Study validity

The validity of obtained results, conclusions and recommendations is based on the available assumptions relating to the thin-walled bars theory, mechanics of deformable solids, theory of building constructions and plates buckling resistance, as well as on the examples of computer modeling and full-scale experiment. The useful model patents (Appendix D and E) are obtained to improve the models of beams with the corrugated webs.

Research assessment

The results of doctoral dissertation were discussed at:

- the international research and practice conference ‘Relevant scientific studies in today’s context’ (Pereiaslav-Khmelnytskyi, 2016);
- the international research and practice conference ‘Actual problems and prospects for building industry development: innovations, modernization and energy efficiency’ (Almaty, 2017);
- the international research and practice conference ‘Science and innovations in the building industry’ (Belgorod, 2018);
- the international research and practice conference ‘Current trends in the architecture and construction: energy efficiency, energy saving, BIM technologies, urban environment problems’ (Almaty, April, 12, 2019);
- the panel discussion ‘SIN-beams. The current state and development trends’, (Moscow, 2019);
- the international research and practice conference ‘International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019)’, (Saint Petersburg, 2019).
- the extended meeting of General construction department of the International Education Corporation (MOK) in 2019.

Publications:

17 works are published on the subject of doctoral dissertation; eight articles are published in the scientific as well as research and practice publications included into the List of publications recommended by the Control Committee in Education and Science under the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan; five articles – in the materials of international conferences; four articles – in the international peer-reviewed journals and conferences including one article published in the journal indexed in Scopus database with the construction percentile of 84 and CiteScore of 2.75.

Range and scope of work:

The doctoral dissertation includes the introduction, five chapters, conclusions and appendices. The work scope embraces 149 pages of typescript text and includes 52 tables, 89 figures, the list of cited references comprising 157 titles and 13 appendices on 56 pages.

The issues relating to the use of corrugated structures in the course of buildings and structures construction are considered in the **first chapter**. The first efforts of experimental and theoretical research of metal structures with the corrugated web on and outside the territory of our republic are studied. The results

of testing of strength and buckling resistance of I-beams corrugated webs (including ones weakened by the holes) are analyzed.

The main conclusions of the **first chapter**:

At the end of 18th century the corrugated structures (so-called ‘bulkheads’) came in use in the shipbuilding industry, and when the welding works were around (since the end of 1920s) they were widely adopted in this field.

Since the 1950s, the corrugated structures with the different shapes of corrugations found a wide application in the construction of bridges, overhead roads and motorways in both Europe and America. In Japan, the corrugated structures came in use in the course of bridges construction only since 1980, but along with this, more than 50 bridges have been built. China began to widely use the corrugated structures since 1990s. However, the first bridge in the Republic of Kazakhstan was put into commission in 2011. To date, more than 10 bridges from corrugated structures have been built.

V-shaped corrugations are the most popular on the territory of Kazakhstan. In the European countries, for example, the channeled corrugations are used, and in Japan and USA – trapezium and rectangularly shaped ones.

The works studying the influence of holes in the webs of deflected beams on their load carrying capacity are limited in number. The studies regarding the influence of holes in the beam webs on the stress concentration near such holes and on the beam deflection are also limited in number.

It is necessary to make the full-scale theoretical and experimental study of beams with the corrugated web including ones weakened by the holes to commonly apply the corrugated structures for the construction of buildings and structures on the territory of the Republic of Kazakhstan.

The questions relating to the estimation of load carrying capacity and existing approaches to design the SIN-beams are considered in the **second chapter**. The available approaches to design of elements of I-shaped cross-section with the transversally corrugated web are analyzed with due regard to the strength as well as local and general buckling resistance. The design variants considering the requirements of building regulations (EN 1993–1–5:2006/2011) of the RK are studied. The experience to design the beams with corrugated webs is learnt from the Kazakhstan building regulations.

The main conclusions of the **second chapter**:

The major factors influencing the load carrying capacity of the beam with corrugated web weakened by the holes are as follows: holes in the beam, spacing of holes in the beam web, hole’s shape, web flexibility as well as hole’s location along the web height.

The influence of holes on the stress and strain state of construction that plays a large part from the theoretical and practical perspective is studied. The stress concentration characterized by the concentration factor is a major challenge of local stress minimization that is constantly tried to be met by the designers of corrugated structures weakened by the holes.

When the holes are made in the beam web, its load carrying capacity is decreased at the moment of deflection. Besides, it continues to decrease under the influence of lateral force.

The probability of loss of web buckling is reduced (according to the European method of shear calculation), and the buckling stress is varied from 60 to 85% of the design resistance (or 30-60% according to the Russian calculation method if consider the same corrugation parameters ($\frac{f}{a}$)).

The approaches relating to the design of corrugated structures that are offered and used by the European scientists increase the load carrying capacity under shear conditions up to 20-30% in comparison with the calculations performed according to the standards accepted on the territory of our republic.

In the **third chapter**, we made the theoretical analysis of corrugated webs with the different shapes and parameters of corrugations. More than 60 variants of various corrugated cross-sections are studied. The influence of corrugation parameters on their buckling resistance is represented in the form of actual moment of inertia on 1 kg of mass of corrugated web steel. Please note the most interesting data relating to the equivalent thickness of plane webs of the same buckling resistance as corrugated ones. The impact of corrugation parameters on their strength is represented in the graphs in the form of actual moment resistance of 1 kg of mass of corrugated web steel. The steel spread is defined as one of the main cost effectiveness indicators of beams with the corrugated webs. The approach to design the corrugated structures according to the requirements of new standards is offered.

The main conclusions of the **third chapter**:

Generally, in the course of detail comparative analysis of SIN-beam data and the state standard of Kazakhstan, the following parameter of beams (according to state standards of Kazakhstan) with the next corrugation parameters are the most effective for increasing the buckling resistance of corrugated webs of different thickness:

- for 3 mm thick corrugated web – SS of Kaz 280×45×2/30;
- for 3 mm thick corrugated web – SS of Kaz 140×45×3/5 t_w ;
- for 4 mm thick corrugated web – SS of Kaz 480×80×4/30;
- for 5 mm thick corrugated web – SS of Kaz 480×80×5/30;
- for 6 mm thick corrugated web – SS of Kaz 480×80×6/30;
- for 8 mm thick corrugated web – SS of Kaz 480×80×8/30;
- for 10 mm thick corrugated web – SS of Kaz 480×80×10/30.

To improve the available methods of design of corrugated structures the method to determine the class of SIN-beam cross-section was worked out. If the web and flanges are classified as class 1 under compression conditions, the general cross-section is classified as class 1 cross-section featuring the functional flange and web. If the deflected web and flanges are classified as class 1, the general cross-section is classified as class 1 cross-section featuring the functional flange and web.

The mathematical modeling of structural concepts of welded I-beams weakened by the holes was conducted in the **fourth chapter**. 56 models of beams with two and three holes featuring the same characteristics were analyzed to determine the most effective values of holes spacing and diameter. Moreover, we envisaged the ways of effective strengthening of round holes. The favorable location of holes throughout the height of corrugated web is defined.

The main conclusions of the **fourth chapter**:

The data on three holes demonstrated the efficiency if the latter are located on the corrugated web with the spacing of $2d$, have the diameter of $0,25h_w$ and $0,5h_w$ and are strengthened by the bordering and parallel webbing.

The data relating to two holes demonstrated the efficiency if the latter are located on the corrugated web with the spacing of $2d / 3d$, have the diameter of $0,25h_w$, $0,5h_w$ and $0,75h_w$ and are strengthened by the bordering and parallel webbing. If the hole spacing is $4d$ its diameter is to be exclusively $0,25h_w$ and $0,5h_w$.

We defined the influence of thickness of bordering and paired parallel webbing at the different bordering width on the functionality of models of beams with the corrugated webs with the holes. Moreover, we envisaged the influence of outer bordering edge deflection on the load carrying capacity of models of beams with the corrugated webs with the holes. All models of beams with the holes strengthened by means of parallel webbing and bordering of different thickness and width demonstrated the less deflection of beam models if compared with the models without holes strengthening.

The most effective thickness of bordering and parallel webbing for the hole with the diameter of $0,25h_w$ and spacing of $2d$ is 2-4 mm; for the hole with the diameter of $0,5h_w$ and spacing of $2d - 4-6$ mm; and for hole with the diameter of $0,75h_w$ and spacing of $2d - 6-8$ mm.

It is more efficiently to use the bordering with the area that is equal to the area of hole.

The influence of hole on the deflection of beam with the strengthened holes is studied with due regard to the location of hole along the height of corrugated web. It is determined that it is more efficient to locate the hole at the center of corrugated web if the hole diameter is $0,5h_w$, and spacing is $2d$, $3d$ and $4d$ in all three cases.

If consider the beams with the hole diameters of $0,5h_w$ and $0,75h_w$, and spacing of $2d$, $3d$ and $4d$, the simultaneous strengthening of holes by means of bordering and web thickening in the hole area by $2t_w$ decreases the deflection of beams which holes are strengthened exclusively by bordering from 7 to 38.5%.

If consider the beams with the hole diameters of $0,5h_w$ and $0,75h_w$, and spacing of $2d$, $3d$ and $4d$, the simultaneous strengthening of holes by means of bordering and web thickening in the hole area by $2t_w$ decreases the deflection of beams on average from 2.3 to 28.5% if compared with the holes strengthened by means of bordering and paired parallel webbing.

The test results of 5 beam models that feature the corrugated webs weakened by two temporary holes and designed with due regard to the most effective

parameters (according to the result of thesis research) are represented in the **fifth chapter**.

Main conclusions of the **fifth chapter**:

The ultimate test loading was always higher for all types of beams with corrugated web than the intended one. This suggests the high reliability of all elements of construction.

The exhaustion of the load carrying capacity of beam models is possible because of the following main reasons:

- loss of local buckling resistance of corrugation planes adjacent to the hole;
- loss of local buckling resistance of upper compressive flange;
- general and local loss of web buckling resistance;
- increased deformability;
- plastic collapse of lower tensile flange;
- bordering deflection of the web plane.

The difference between the computer-generated and test values of metal deflection at the elastic stage ranges from 0.37 to 5.5% for all tested models thus confirming the reliability of selected design program. The difference between the computer-generated and test values of metal deflection at the elastic stage for BGS-1 model is 1.5%.

Generally, the conducted tests demonstrated the necessity and economic efficiency of performed experimental works aimed to define the optimal ways of holes strengthening to meet the requirements of process engineers carrying the equipment within the overall height of beams as well as reduce the consumption of steel for holes strengthening and labor hours.