

Учреждение образования

«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 624.078.416:624.014.001.24(043.3)

ШАЛОБИТА

Николай Николаевич

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
УЗЛА ИЗ ПОЛОГО ШАРА НОВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Брест, 2009

Работа выполнена в Учреждении образования «Брестский государственный технический университет» на кафедре «Строительные конструкции»

Научный руководитель: Драган Вячеслав Игнатьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции» УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Официальные оппоненты: Лазовский Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, ректор УО «Полоцкий государственный университет», г. Полоцк
Мартынов Юрий Семенович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции» УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск

Оппонирующая организация: УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

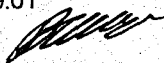
Защита состоится 26 февраля 2009 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций К.02.09.01 при Учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: г. Брест, ул. Московская 267, ауд. 1/323.

Отзывы просим направлять по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская 267, УО «БрГТУ», ученому секретарю Совета по защите диссертаций, тел.: (0162) 42-02-94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Автореферат разослан "23" января 2009 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций К.02.09.01
кандидат технических наук



Шевчук В.Л.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях рыночной экономики особо актуальна в области капитального строительства тематика применения эффективных строительных материалов и конструкций в зданиях и сооружениях. Особая роль здесь принадлежит совершенствованию легких металлических конструкций, позволяющих строить просто, быстро, выгодно. Пространственные металлические стержневые конструкции относятся к наиболее перспективному направлению в строительной индустрии, так как обладают высокой архитектурной выразительностью, малой металлоемкостью, большой пространственной жесткостью, надежностью в эксплуатации и др. Они находят применение как при возведении зданий промышленного и общественного назначения, так и в уникальных сооружениях. Совершенствование конструктивных решений структурных конструкций, разработка эффективных элементов и их сопряжений в конструкции, является задачей важной и актуальной.

Поиски скрытых резервов в проектировании пространственных структурных конструкций привели к созданию новых конструктивных форм, основными несущими элементами которых являются трубчатые профили и новые эффективные узлы их сопряжения. Предварительный технико-экономический анализ показывает, что по сравнению с аналогами в них можно добиться значительного снижения расхода металла и стоимости.

Серьезной проблемой внедрения новых пространственных систем является недостаточная изученность их работы, в том числе узлов сопряжения. Решение данной задачи возможно только с использованием комплексного подхода, основанного на базе экспериментально-теоретических исследований и численного моделирования составляющих элементов, а также натуральных экспериментальных исследований их совместной работы в составе сооружения. Данный подход позволяет разработать более совершенные методы проектирования, изготовления и монтажа пространственных металлических структурных конструкций, которые являются, несомненно, востребованными в строительстве.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами. Работа выполнена в рамках государственной программы ориентированных фундаментальных исследований (ГПОФИ) по заданию «Строительство и архитектура 40» Г/Б 06/610 «Разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния сложных стальных и сталежелезобетонных конструкций при нестационарных силовых и несиловых воздействиях».

Цель и задачи исследования.

Целью настоящей работы является разработка нового узла пространственной металлической структурной конструкции и методики расчета его несущей способности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проанализированы применяемые в мировой практике строительства типы узлов металлических структурных конструкций, определены критерии к разработке нового узла в виде полый толстостенной сферы с отверстиями;
- разработан новый тип узла в виде полый толстостенной сферы с отверстиями под высокопрочные болты для крепления стержней, определены его основные технико-экономические показатели;
- разработана оригинальная методика и выполнены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния узла;
- разработана численная расчетная модель и выполнены исследования напряженно-деформированного состояния узлов из полых шаров с отверстиями при всех возможных ситуациях нагружения локальными сосредоточенными силами, характерными для структурных конструкций;
- исследован характер наступления предельного состояния узла при многоосном нагружении локальными силами;
- разработана методика расчета на прочность нового узла структурной конструкции;
- выполнена натурная проверка работы узла при работе в составе большепролетной структурной конструкции.

Объект исследования – узел металлической структурной конструкции.

Предмет исследования – прочность и деформативность узла в составе большепролетной структурной конструкции.

Положения, выносимые на защиту:

- впервые разработанное конструктивное решение нового узла (типа «БргТУ») из полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами под высокопрочные болты металлической структурной конструкции;
- результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния полый толстостенной сферической оболочки с отверстиями и подкрепляющими шайбами в условиях многоосного нагружения локальными сосредоточенными нагрузками;
- основные закономерности и критерии наступления предельного состояния узла в виде полого шара с отверстиями при многоосном нагружении усилиями в стержнях структурной конструкции;
- методика расчета на прочность узла типа «БргТУ» новой металлической структурной конструкции;
- результаты натуральных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния узлов большепролетной структурной конструкции.

Личный вклад соискателя:

- анализ и систематизация известных конструктивных решений узлов металлических структурных конструкций;
- разработка конструкции нового узла в виде полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами и высокопрочными болтами новой структурной конструкции типа «БрГТУ»;
- экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния узла в виде полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами при многоосном нагружении локальными усилиями, действующими в стержнях структурной конструкции;
- разработка методики расчета прочности узла в виде полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами металлической структурной конструкции покрытий типа «БрГТУ»;
- натурная экспериментальная проверка исследований напряженно-деформированного состояния узла в системе большепролетного структурного покрытия.

Апробация результатов диссертации.

Результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах:

- XIV Международном научно-практическом межвузовском семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь», г. Минск, 2007г.;
- II Международном научно-практическом семинаре по реализации задач ГПОФИ «Строительство и архитектура», Минск, 2007 г.;
- XV Международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Новополоцк, 2008 г.

Опубликованность результатов диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 основных печатных работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях по перечню ВАК РБ, общим объемом – 5,27 авторских листа, из них в научных изданиях по перечню ВАК – 2,36 авторских листа. Получено 6 патентов на полезную модель и 4 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, представленной 4 главами, заключения, библиографического списка из 146 наименований (включая собственные публикации), 4 приложений, 71 рисунка, 8 таблиц. Полный объем диссертационной работы составляет 146 страниц, в том числе 98 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ развития металлических структурных конструкций и требований, которые предъявляются к ним на современном этапе. Отмечается, что имеется значительное многообразие различных форм указанных конструкций, отличающихся как в архитектурном исполнении, так и в конструктивном решении.

Вопросам проектирования и расчета пространственных металлических структурных конструкций посвящены работы Р.И. Хисамова, А.З. Клячина, В.К. Файбишенко, Н.П. Мельникова, В.Н. Гордеева, М.Л. Гринберга, Р. Ле Риколе, К. Ваксмана, Р.Б. Фуллера, Ф. Ледерера, С. Дю Шато, Д. Райта и др.

Из применяемых в практике строительства узловых соединений, пригодных для любых нагрузок по прочности, можно считать системы "Меро" и "Октаплатт", а также узлы на основе ванной сварки — узел "ЦНИИСК" и др. Наиболее мобильными следует признать сборно-разборные узловые соединения типа "Меро", "Триодетик" и "ИФИ". Что касается узловых соединений «ЦНИИСК» и «Октаплатт», то они очень трудоемки при выполнении, а «Триодетик» имеет небольшую жесткость и высокую металлоемкость. Для узлов «Меро», при достаточной жесткости, характерна большая металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Каждый из описанных узлов уникален, но несовершенен и наряду со множеством достоинств имеет и недостатки, которые в конечном итоге могут оказать, и зачастую оказывают, существенное влияние на напряженно-деформированное состояние структурных конструкций. Основным недостатком используемых узлов является то, что в них отсутствует возможность полного центрирования всех усилий, сходящихся в узле, и как следствие — появление дополнительных усилий в стержнях элементов и изменение характера их работы. Большинство узлов не могут гарантировать включения абсолютно всех стержней в работу, что приводит к значительному искажению действительного напряженно-деформированного состояния структурной конструкции. Малые допуски отклонений линейных размеров соединяемых элементов, сложная станочная обработка при изготовлении узловых сопряжений, значительный объем монтажной сварки, а также жесткий контроль при приеме отправочных элементов вызывают значительное удорожание такой конструкции [1, 6].

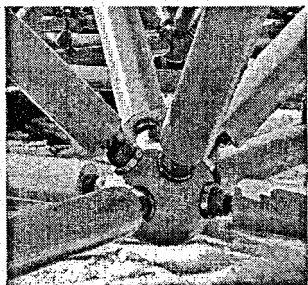
Проведенные исследования существующих конструктивных решений узлов для соединения стержней структурных систем выявили, что приоритетным направлением в области их разработки является поиск предельно облегченных, жестких и обладающих высокой несущей способностью типов узловых соединений, исключающих силовые и конструктивные эксцентриситеты и обеспечивающих включение абсолютно всех стержней конструкции в работу. Установ-

лено, что, безусловно, этим требованиям отвечают комбинированные узлы сферического типа. Поэтому, при разработке и исследовании нового типа узлового соединения, были учтены наиболее важные неблагоприятные факторы и установлена возможность их исключения или компенсации.

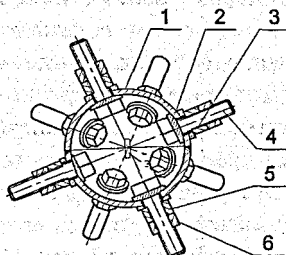
Во второй главе приводится описание нового комбинированного узла (типа «БрГТУ»), разработанного с непосредственным участием автора, для наиболее распространенных структурных конструкций, а также модификации данного узла, направленные на повышение его несущей способности и снижение трудозатрат при монтаже, с соответствующей технико-экономической оценкой данного узлового соединения.

Узел выполнен в виде полого шара с отверстиями в стенке (рисунок 1). Шар изготавливается из двух полусфер, полученных путем горячего прессования из листового проката, соединенных стыковым швом с разделкой кромок. В полусферах имеются отверстия под крепежные (высокопрочные) болты, диаметром на 1.0 мм больше диаметра соответствующего болта.

а)



б)



а) общий вид, б) поперечный разрез

1 — полусфера; 2 — внутренняя шайба с выпуклой поверхностью;

3 — наружная шайба с вогнутой поверхностью; 4 — болт;

5 — силовая гайка; 6 — контргайка

Рисунок 1 — Узел структурной конструкции типа «БрГТУ»

Высокопрочные болты, предназначенные для соединения стержневых элементов структурной плиты, пропущены со стороны полости шара через данные отверстия и имеют возможность свободного вращения вокруг собственной оси, что обеспечивает свободную сборку элементов решетки структуры (рисунок 1). Болты снабжены двумя гайками — силовой и контргайкой, которые в проектом положении надежно стопорят высокопрочный болт относительно стержня структуры и сферы узлового элемента. Между головками болтов и внутренней поверхностью шара, а также силовыми гайками и наружной поверхностью шара установлены специальные жесткие шайбы со сферическими поверхностями [1, 3, 7].

Следует отдельно отметить, что выполнение отверстий в стенке полого шара диаметром, превышающим диаметр болтов, имеет очень важное значение, так как обеспечивает возможность поворота болтов при сборке узла на расчетный угол, что в значительной степени упрощает сборку и позволяет снизить допуски при изготовлении узла и стержней структурной конструкции.

Важной особенностью конструкции узла является применение под высокопрочные болты специальных шайб со сферическими, обращенными к шару поверхностями. Данная конструкция шайб обеспечивает центровку стержней на центр узла при закручивании силовой гайки, исключая появление эксцентриситетов.

Диаметр и толщина стенки шара, диаметр и марка стали высокопрочных болтов, а также размеры сферических шайб назначаются исходя из величины действующих усилий в стержнях, используя принцип равнопрочности всех элементов рассматриваемого узла структуры.

Таким образом, предложенное конструктивное решение узла структурной конструкции типа «БрГТУ», а также технология монтажа структур на его основе, позволяют произвести сборку стержневых элементов в узлах, обеспечивая точное проектное положение всей конструкции, исключить силовые и конструктивные эксцентриситеты, включить в работу все сходящиеся в узле стержни структурной конструкции путем первоначально создаваемого с использованием силовых гаек усилия натяжения в стержнях.

Кроме предложенного базового решения узла структурной конструкции типа «БрГТУ» разработано шесть его модификаций, которые позволяют существенно снизить трудозатраты на изготовление и монтаж [8, 9, 10, 13], увеличить его несущую способность [9, 14, 15, 16], повысить производительность труда при сборке структуры [9, 11, 12, 13].

Применение нового узла позволяет конструировать покрытия для восприятия высоких значений нагрузок (более 3 кН/м^2), перекрывать пролеты более 36 м без промежуточных опор. Использование узла типа «БрГТУ» позволяет получить значительный технико-экономический эффект: снижение металлоемкости структур на 10-20% (расход стали 30-60 кг/м^2), уменьшение трудоемкости их изготовления на 30% (менее 0.18 чел. час/ м^2) [1].

В третьей главе представлен анализ теоретических исследований напряженно-деформированного состояния толстостенных сферических оболочек с отверстиями под действием локальных нагрузок.

Анализ конструктивного решения узла структурной конструкции типа «БрГТУ» позволил установить, что его несущая способность должна определяться исходя из несущей способности высокопрочного болта и несущей способности толстостенной сферы. Полая толстостенная сфера узла с отверстиями в стенке и подкрепляющими шайбами является, с точки зрения анали-

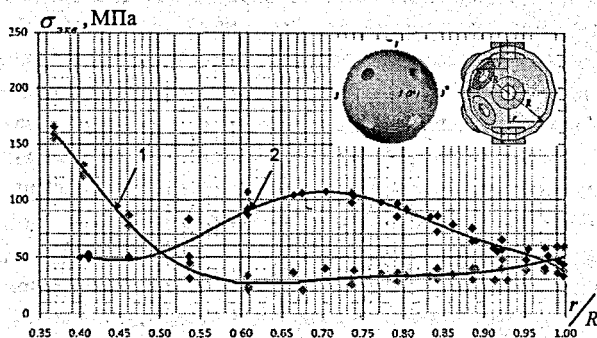
тического расчета, очень сложной системой, в которой напряженно-деформированное состояние зависит от многих факторов: диаметра сферы, толщины ее стенки, диаметра и мест расположения отверстий, количества локальных нагрузок и т.д. Предложенные Ю.А. Шевляковым, Г.Н. Чернышевым, Ю. Г. Коноплевым и др. упрощенные теоретические зависимости позволяют определять напряжения от отдельных доминирующих усилий в сферической оболочке под действием, как правило, одной локальной нагрузки, распределенной на малой площадке в полюсе. При этом требуется выполнить значительное количество сложных математических вычислений для определения меридиональных изгибающих моментов (M), нормальных сил (T) и радиальных перемещений (w). Другими усилиями и соответственно напряжениями от них в расчетах пренебрегают.

Более оптимальным и достоверным методом исследования напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния, является численный метод. В связи с этим автором создана численная расчетная модель полой толстостенной сферы с подкрепляющими шайбами узла, разработанная с использованием конечно-элементного моделирования с применением вычислительного пакета «MSC.visualNastran for Windows». Для построения конечно-элементной трехмерной модели применено твердотельное моделирование с использованием конечных элементов «Solid» (твердотельные пространственные пяти- и шестигранные элементы типа «Brick» («Брусок») и «Wedge» («Клин)). Автором также смоделирована контактная зона «шайба-сфера» с малыми жесткостными характеристиками на сдвиг. Это позволило наиболее объективно для разработанной конечно-элементной модели учесть работу шайб в составе конструкции узла. В расчетной модели варьировались такие параметры, как различные варианты загрузений локальными нагрузками (одноосное, двухосное и сложное), геометрические размеры полой толстостенной сферы (толщина, радиус), размеры подкрепляющих шайб. Для достоверной оценки прочности был произведен детальный анализ по нескольким критериям текучести: эквивалентным напряжениям по Губеру-Мизесу ($\sigma_{экс}$); максимальным главным напряжениям (σ_I) и максимальным касательным напряжениям (τ_{max}).

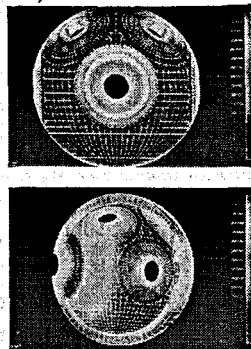
Анализ графиков изменения эквивалентных напряжений на внутренней и наружной поверхностях сферы, построенных в координатах $r/R-\sigma_{экс}$, свидетельствует о наличии изгиба в меридиональном направлении (рисунок 2). Эквивалентные напряжения достигают максимального уровня по кольцевой зоне на наружной поверхности оболочки у края площадки приложения нагрузки, т.е. по грани наружной шайбы. По мере удаления от внешней границы контакта шайбы со сферой происходит резкое уменьшение значений эквивалентных напряжений на внешней поверхности и увеличение на внутренней [3, 4, 5, 6].

Сравнение распределения главных нормальных и касательных напряжений также свидетельствует о том, что наиболее опасной является кольцевая зона у края подкрепляющей шайбы.

а) -



б)



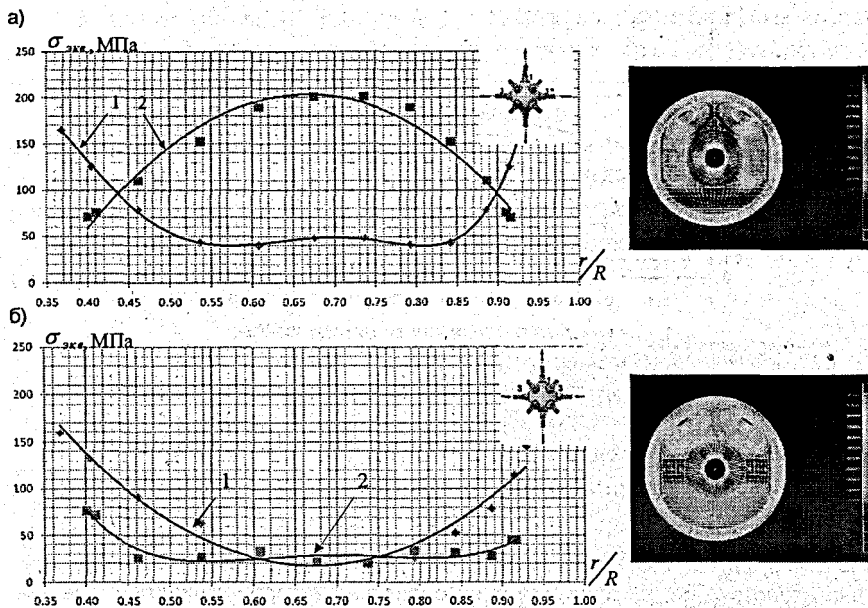
а) график эквивалентных напряжений,

б) изополя эквивалентных напряжений на наружной и внутренней поверхностях сферы
1 - на внешней поверхности; 2 - на внутренней поверхности

Рисунок 2 - Распределение эквивалентных напряжений в сфере при одноосном растяжении

На основании теоретических вычислений и данных расчета численной модели установлено, что максимальными являются меридиональные напряжения. Это позволяет с определенной степенью точности оценить несущую способность сферы при одноосном нагружении сосредоточенными силами по приближенным теоретическим формулам.

Численное моделирование позволило выявить еще один пик напряженности, расположенный на внутренних волокнах сферы в области с координатами $r/R=0,65 \div 0,75$. Как показали исследования напряженно-деформированного состояния сферы узла, при ее двухосном нагружении взаимно перпендикулярными сосредоточенными силами имеет место наложение соответствующих меридиональных напряжений вдоль образующих (1-3 и 1-3*), соединяющих точки приложения данных усилий. В случае взаимно перпендикулярных сил одного знака (двухосное растяжение или двухосное сжатие), происходит увеличение эквивалентных напряжений на внутренней поверхности сферы в отмеченной выше области, а при усилиях разного знака (двухосное растяжение-сжатие) - уменьшение эквивалентных напряжений (рисунок 3). Величина максимальных эквивалентных напряжений в кольцевой зоне на внешней поверхности сферы (по кромке примыкания шайбы к сфере) практически не изменяется от схемы нагружения [6].

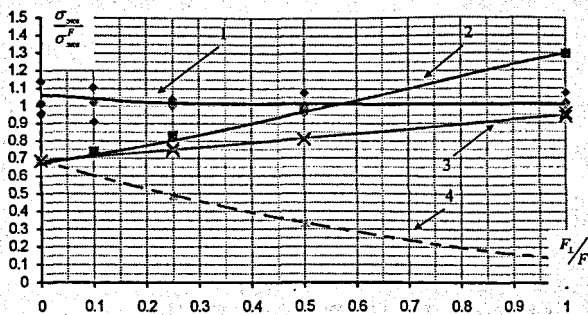


а) при двухосном растяжении, б) при двухосном растяжении-сжатии
 1 – на внешней поверхности, 2 – на внутренней поверхности

Рисунок 3 – Распределения эквивалентных напряжений и их изополя при двухосном нагружении вдоль образующих 1-3 и 1-3*

Исследовано влияние взаимно перпендикулярных локальных сил на напряженное состояние узла. В связи с этим усилие в одном направлении назначалось постоянным (усилие F), усилие в перпендикулярной плоскости (F_{\perp}) изменялось от 0 до значений силы F . Установлено, что при уровне локального усилия в перпендикулярной плоскости F_{\perp} , не превышающего $0,53 \div 0,55$ уровня усилия F , наиболее нагруженная область в теле толстостенной сферы всегда располагается на ее внешней поверхности вокруг подкрепляющей шайбы (рисунок 4) [5].

При двухосном растяжении-сжатии для любого соотношения усилий максимальные эквивалентные напряжения на внутренней поверхности сферы не превышают максимальных эквивалентных напряжений по наружной поверхности по контуру шайбы при одноосном нагружении. При этом, увеличение одного из усилий приведет только к снижению напряженности внутренних слоев. В то же время при двухосном растяжении имеет место увеличение эквивалентных напряжений.



1 – на внешней поверхности по контуру шайбы;

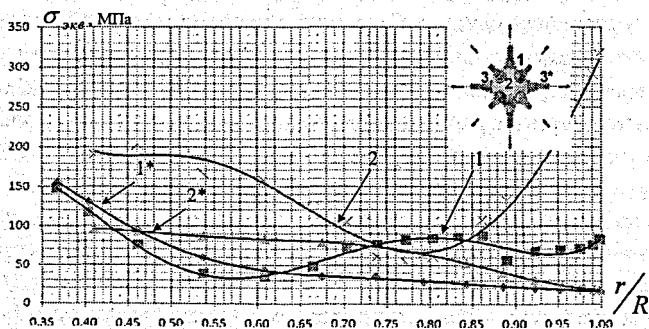
2 – на внутренней поверхности по образующей 1-3 при двухосном растяжении;

3 – на внутренней поверхности по образующей 1-2 при двухосном растяжении-сжатии;

4 – на внутренней поверхности по образующей 1-3 при двухосном растяжении-сжатии

Рисунок 4 – Изменение отношений эквивалентных напряжений при двухосном нагружении узла усилиями в поясах структуры

Анализ различных схем сложного нагружения толстостенной сферы локальными усилиями, возможными при реальной работе узла в составе структурной конструкции, выявил еще одну область, в которой эквивалентные напряжения имеют значения, превышающие уровень эквивалентных напряжений на внешней поверхности сферы по кромке шайбы. Данная область образуется на внутренних волокнах сферы в полюсе между четырьмя локальными силами, приложенными в пространстве под углом в 45° к экватору сферы (рисунок 5). Эквивалентные напряжения в данной области достигают максимального значения только в случае, когда сфера загружена локальными силами в раскосах, имеющими различное направление действия и при отношении меньшего из них к большему, превышающего 0,45-0,50 [5].



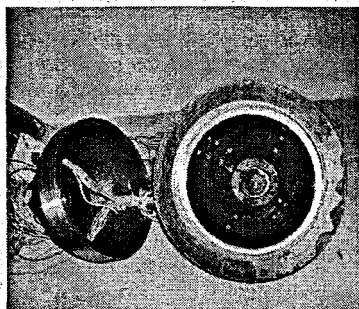
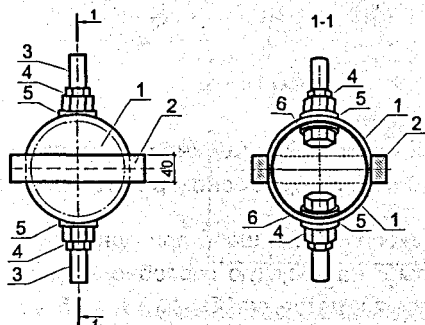
1 и 1* – на внешней поверхности сферы вдоль образующих 1-2 и 1-2*;

2 и 2* – на внутренней поверхности сферы вдоль образующих 1-2 и 1-2*

Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений при сложном нагружении

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований работы нового узла, выполненного в виде полого шара с отверстиями в стенке.

Исследования напряженно-деформированного состояния толстостенной сферы специальных опытных образцов производились на экспериментальной установке при нагружении сосредоточенными силами в условиях одноосного растяжения (сжатия) и двухосного растяжения-сжатия. Варьируемыми параметрами являлись: геометрические параметры сферы – толщина и радиус; размеры подкрепляющих шайб (рисунки 6, 7) [2].



- 1 – полусфера; 2 – жесткое соединительное кольцо с резьбой; 3 – болт;
 4 – силовая гайка; 5 – наружная шайба с вогнутой поверхностью;
 6 – внутренняя шайба с выпуклой поверхностью

Рисунок 6 – Конструкция экспериментального образца

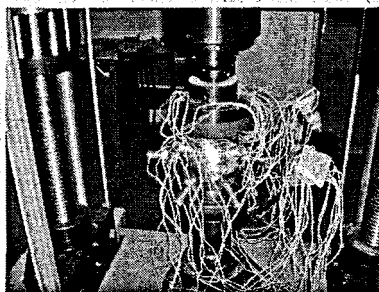
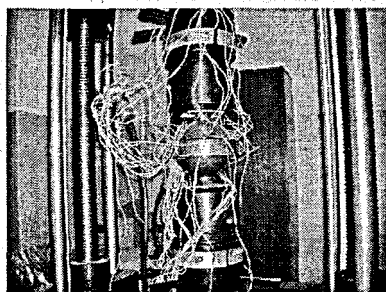


Рисунок 7 – Исследование напряженно-деформированного состояния сферы узла в условиях осевого растяжения

Экспериментальными исследованиями установлено, что предельное состояние в сфере наступает в результате развития значительных пластических деформаций в кольцевой зоне, образующейся вблизи кромки примыка-

но определить расчетную несущую способность F_{\max} при различных ее толщинах исходя из условия прочности:

$$F_{\max} = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\sigma_{\text{экв}}(h)} \cdot F, \quad (1)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали растяжению;

γ_c – коэффициент условий работы;

$\sigma_{\text{экв}}(h)$ – эквивалентное напряжение при толщине сферы h .

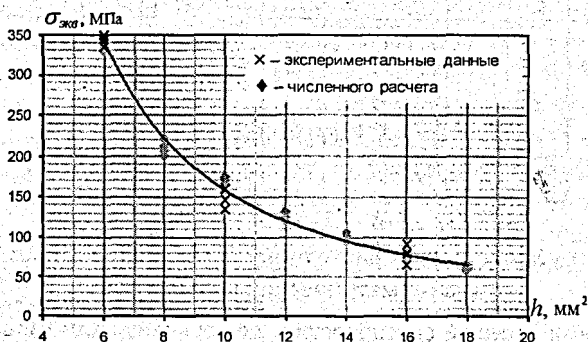


Рисунок 10 – Зависимость эквивалентных напряжений от толщины сферы при одноосном растяжении сосредоточенной силой $F=100$ кН

На основании проведенных экспериментов и численных расчетов различных моделей полого шара с отверстиями установлено, что под действием локальной силы F прилегающая к подкрепляющей шайбе часть оболочки подвержена действию концентрации изгибных напряжений, распространяющихся вдоль меридиана на длину зоны краевого эффекта, размер которого с достаточной степенью точности можно принять равным $\sqrt{R \cdot h}$. По аналогии с напряженно-деформированным состоянием кольцевых пластин максимальные нормальные напряжения в зоне краевого эффекта приближенно можно определить по следующей формуле:

$$\sigma_{\max} \approx \frac{k \cdot F_{\max}}{\gamma} \leq R_y \cdot \gamma_c \quad (2)$$

где k – коэффициент, принимаемый по графику [5],

γ – геометрический параметр, равный $\frac{\sqrt{R \cdot h} \cdot h^2}{r_{ш}}$,

R – внешний радиус сферы,

$r_{ш}$ – радиус подкрепляющей шайбы.

В таком случае связь между расчетной несущей способностью F_{\max} и геометрическими характеристиками узла можно записать следующим образом:

$$F_{\max} \approx \gamma / k \cdot R_y \cdot \gamma_c \quad (3)$$

Построив график зависимости $F_{\max} \sim \gamma$ (рисунок 11), можно определить предельные усилия, воспринимаемые сферами различной геометрии в упругой области работы материала, с точностью, достаточной для проектирования структурных конструкций.

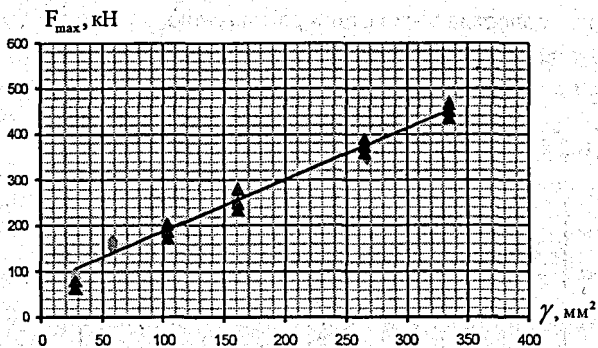
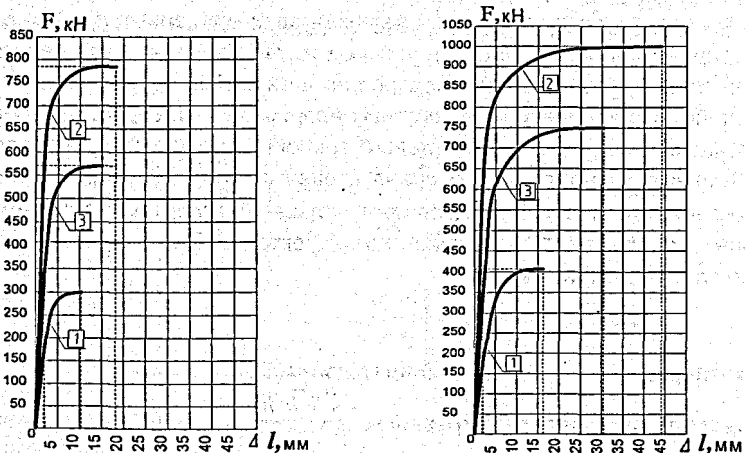


Рисунок 11 – Зависимость расчетной несущей способности узла от его геометрических параметров

Для оценки несущей способности и деформативности узла выполнены статические испытания узлов в условиях одноосного растяжения (сжатия) с построением диаграмм его деформирования (рисунок 9).



1 – узел 160/10; 2 – узел 212/16; 3 – узел 208/14

Рисунок 12 – Диаграммы деформирования узлов системы "БрГТУ"

Выявлено, что при нагрузках, близких к предельным, имеет место развитие пластических деформаций стали в кольцевой зоне вокруг подкрепляю-

щих шайб, сопровождающееся выпучиванием или вдавливанием стенки шара при растяжении или сжатии соответственно. Появление заметных пластических деформаций, изменяющих форму шара в других зонах, образование трещин в его стенке не происходит [2, 4].

Анализ полученных экспериментально-теоретических данных исследований позволил установить, что величина расчетной несущей способности F_{\max} , полученной по формуле (3), хорошо согласуется с экспериментальными значениями максимальных усилий упругой работы узла, определенным по диаграммам деформирования. Предельное состояние узла наступает при нагрузках, превышающих в 1,5+1,7 раза нагрузки, определяющие его расчетную несущую способность.

В результате экспериментального исследования натурной структурной конструкции «БрГТУ» покрытия сцены летнего театра в г. Бресте установлено, что заложенные в расчет значения жесткостных характеристик новых узлов с высокой степенью точности позволили оценить напряженно-деформированное состояние структуры и показали высокую сходимость данных численного расчета и экспериментальных. Эксперимент подтвердил высокую несущую способность нового узла [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Основные выводы по результатам выполненной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана новая металлическая структурная конструкция, получившая в практике строительства название система «БрГТУ», отличающаяся от известных решений конструкцией узла и стержня, обладающая рядом достоинств, основными из которых являются: архитектурная выразительность и привлекательность сооружений, высокая несущая способность и пригодность воспринимать нагрузки свыше 3 кН/м^2 при пролетах до 150 м, высокая индустриальность изготовления всех элементов, их полная заводская готовность, возможность их широкой унификации для зданий с различными пролетами, нагрузками, схемами опирания, эффективность по металлоемкости, трудозатратам и сокращениям сроков строительства [1, 2].

2. Разработан сортамент узлов с различными диаметрами и толщиной полых шаров, размерами подкрепляющих шайб и высокопрочными болтами, для восприятия усилий в стержнях структуры от 100 до 1000 кН. Предложенная конструкция узла обеспечивает высокую надежность работы по сравнению с известными конструктивными решениями («Меро», «МАрХИ» и др.) за счет исключения силовых и конструктивных эксцентриситетов, включения в

работу всех стержней, обеспечения требуемой точности сборки и проектно-го положения структурной конструкции [1, 2, 3].

3. Разработана принципиально новая методика испытания узлов структуры, позволяющая исследовать напряженно-деформированное состояние и распределение напряжений на внутренней и наружной поверхностях полого шара, определить уровень концентрации напряжений при многоосном нагружении узла усилиями стержней структурной конструкции [2, 4, 5].

4. Впервые выполнен анализ напряженно-деформированного состояния полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами при многоосном нагружении локальными нагрузками и установлены закономерности распределения напряжений и деформаций в зависимости от диаметра и толщины полого шара, размеров подкрепляющих шайб, величины локальных нагрузок от усилий в стержнях структуры [5, 6].

5. Установлены основные зоны повышенной напряженности в теле шара и определены условия их появления в зависимости от соотношения величин и знаков усилий: кольцевая, вокруг подкрепляющей шайбы; по центру линии, соединяющей ближайшие отверстия в плоскости экватора; в полюсе; между четырьмя наклонными отверстиями [5, 6].

6. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования предельного состояния полого шара с отверстиями позволили установить, что при любых соотношениях усилий в стержнях структуры исчерпание несущей способности узла происходит всегда в результате развития пластических деформаций стали в кольцевой зоне вокруг шайб, сопровождающееся выпучиванием или вдавливанием стенки шара при растяжении или сжатии соответственно. Появления пластических деформаций, изменяющих форму шара в других зонах, либо образования трещин в его стенке, не происходит [2, 6].

7. Разработана достоверная методика определения несущей способности узлов структурной конструкции, основанная на сопоставлении максимального усилия, действующего на узел, с максимальным допускаемым усилием, назначенным на основании диаграммы деформирования («нагрузка-деформация») при одноосном растяжении или сжатии полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами [2, 3, 6].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследований внедрены в строительный проект и конструкторскую документацию ряда построенных объектов: «Металлическая структурная плита покрытия летнего театра в ПКЮ г. Бреста», «Металлическое структурное покрытие Ледовой арены в г. Пружаны», «Металлическое покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске», «Навес над стадионом «Спартак» в г. Гомеле», другие объекты, всего 15 на территории Республики Беларусь, а также учебный процесс УО «БрГТУ» [2, 3, 7, 8, 15, 16].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научно-технических журналах

1. Шалобыта, Н.Н. К вопросу эффективности узлового соединения структурных конструкций / Н.Н. Шалобыта, В.И. Драган // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2006. – № 1 (37). – С. 127-130.
2. Шалобыта, Н.Н. Экспериментальное исследование несущей способности узлов структурных конструкций системы «БрГТУ» / Н.Н. Шалобыта, В.И. Драган, Т.П. Шалобыта // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1(49). – С. 94-102.
3. Драган, В.И. Конструктивные решения и основные результаты расчетов большепролетного металлического покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске / В.И. Драган, Н.Н. Шалобыта, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, В.А. Лебедь, Л.Г. Головкин, А.Б. Шурин, В.В. Люстибер, А.В. Мигель // Строительная наука и техника – 2007. – № 3 (12). – С. 18-29.

Статьи в периодических сборниках научных трудов

4. Драган, В.И. Разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния сложных стальных и сталежелезобетонных конструкций при нестационарных силовых и несиловых воздействиях / В.И. Драган, Н.Н. Шалобыта, А.В. Мухин, В.В. Люстибер // Сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач ГПОФИ «Строительство и архитектура», Минск, 19-21 сентября 2007 г.: в 3 т. – Минск, 2008. – Т.1. – С. 224 – 242.
5. Шалобыта, Н.Н. Напряженно-деформированное состояние толсто-стенной сферической оболочки узлового элемента «БрГТУ» под действием локальных нагрузок / Н.Н. Шалобыта // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV Международного науч.-метод. семинара, Новополоцк, 27-28 ноября 2008 г.: в 2 т. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: Д.Н. Лазовский [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т.1 – с. 174-181.

Материалы конференций

6. Шалобыта, Н.Н. Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением «БрГТУ» / Н.Н. Шалобыта, В.И. Драган // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. ст. XIV междунар. науч.-практ. межвузовского семинара, Минск, 2007 г. в 2-х т. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 133-138.

Патенты

7. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2489 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, А.А. Левчук, Н.Н. Шалобьта, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20050458; заявл. 21.07.2005; опубл. 28.02.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 193.

8. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2550 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, В.Н. Пчелин, А.А. Левчук, Н.Н. Шалобьта; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20050465; заявл. 26.07.2005; опубл. 28.02.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 194.

9. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2682 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, Н.Н. Шалобьта, А.А. Левчук, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20050545; заявл. 12.09.2005; опубл. 30.04.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 184.

10. Пространственный каркас из полых стержней: пат. 3167 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, В.Н. Пчелин, Н.Н. Шалобьта, А.А. Левчук; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20060311; заявл. 17.05.2006; опубл. 30.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6. – С. 193.

11. Узел соединения поясов и раскосов пространственного каркаса из полых стержней: пат. 3168 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, Н.Н. Шалобьта, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20060312; заявл. 17.05.2006; опубл. 30.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6. – С. 193.

12. Узел соединения пространственного каркаса из полых стержней: пат. 3244 Респ. Беларусь, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, В.А. Мухин, Н.Н. Шалобьта, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. – № и 20060314; заявл. 18.05.2006; опубл. 30.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6. – С. 191.

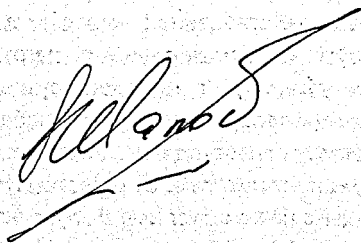
13. Узел соединения стержней пространственного каркаса: пат. 10720 Респ. Беларусь, МПК (2006) Е 04В 1/58 / В.И. Драган, Н.Н. Шалобьта, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. – № а 20060393; заявл. 30.12.2007; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 122.

14. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 10722 Респ. Беларусь, МПК (2006) Е 04В 1/58 / В.И. Драган, В.Н. Пчелин, А.А. Левчук, Н.Н. Шалобьта; заявитель Брестский гос. ун-т. – № а 20060351;

заявл. 30.12.2007; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 121.

15. Узел соединения полых стержней поясов и раскосов пространственного каркаса: пат. 10725 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04B 1/58 / В.И. Драган, В.Н. Пчелин, Н.Н. Шалобыта, В.А. Тимошук; заявитель Брестский гос. ун-т. – № а 20060460; заявл. 30.12.2007; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 122.

16. Узел соединения элементов пространственного каркаса из полых стержней: пат. 10853 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04B 1/58 / В.И. Драган, В.Н. Пчелин, Н.Н. Шалобыта, А.А. Левчук; заявитель Брестский гос. ун-т. – № а 20060352; заявл. 30.12.2007; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 121.



РЭЗЮМЭ

Шалабыта Мікалай Мікалаевіч

Напружана-дэфармаваны стан вузла з палага шара новай металічнай
структурнай канструкцыі

Ключавыя словы: вузел, структурная канструкцыя, напружана-дэфармаваны стан, эквівалентныя напружанні, колькаснае мадэліраванне, цякучасць, лакальныя сілы.

Мэта работы — распрацоўка новага вузла ў выглядзе палага шара з адтулінамі і шайбамі, якія падмацоўваюць, пад высокатрывалыя балты металічнай структурнай канструкцыі і метады разліку яго нясучай здольнасці.

Метады даследавання. Распрацоўка і аналіз вынікаў колькаснага мадэліравання полай таўстасценнай сферы з шайбамі вузла, якія падмацоўваюць, пры ўсіх магчымых сітуацыях нагружэння сканцэнтраванымі сіламі, характэрнымі для структурных канструкцый. Эксперыментальныя даследаванні натуральных узораў вузлоў у лабараторных умовах для даследавання характару наступлення гранічнага стану вузла пры многавосным напружанні лакальнымі сіламі. Натурныя выпрабаванні структурнай канструкцыі з новымі вузлавымі злучэннямі.

Атрыманыя вынікі і навізна. Упершыню распрацаванае канструктыўнае рашэнне новага вузла (тыпу "БрДТУ") з палага шара з адтулінамі і шайбамі, якія падмацоўваюць, пад высокатрывалыя балты металічнай структурнай канструкцыі. На аснове эксперыментальных і тэарэтычных даследаванняў устаноўлены асноўныя заканамернасці і крытэрыі наступлення гранічнага стану вузла ў выглядзе палага шара з адтулінамі пры многавосным нагружэнні намаганнямі ў стрыжнях структурнай канструкцыі. Адтрымана метадыка разліку на трываласць вузла тыпу "БрДТУ" новай металічнай структурнай канструкцыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанню. Распрацаваны вузел і метадыку яго разліку і канструявання рэкамендуецца выкарыстоўваць у праектна-канструктарскіх арганізацыях пры праектаванні вялікапалётных металічных структурных канструкцый, а таксама ў навучальным працэсе ўстаноў адукацыі для падрыхтоўкі спецыялістаў будаўнічых спецыяльнасцей.

Вобласць прымянення. Вялікапалётныя пакрыцці ўнікальных аб'ектаў, пакрыцці прамысловых і грамадскіх будынкаў, праектна-канструктарскія арганізацыі, будаўнічыя ВНУ.

РЕЗЮМЕ

Шалобьта Николай Николаевич

Напряженно-деформированное состояние узла из полого шара новой металлической структурной конструкции

Ключевые слова: узел, структурная конструкция, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, численное моделирование, текучесть, локальные силы.

Цель работы – разработка нового узла в виде полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами под высокопрочные болты металлической структурной конструкции и метода расчета его несущей способности.

Методы исследования. Разработка и анализ результатов численного моделирования полой толстостенной сферы с подкрепляющими шайбами узла при всех возможных ситуациях нагружения сосредоточенными силами, характерными для структурных конструкций. Экспериментальные исследования натурных образцов узлов в лабораторных условиях для исследования характера наступления предельного состояния узла при многоосном нагружении локальными силами. Натурные испытания структурной конструкции с новыми узловыми соединениями.

Полученные результаты и новизна. Впервые разработанное конструктивное решение нового узла (типа «БрГТУ») из полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами под высокопрочные болты металлической структурной конструкции. На основании экспериментальных и теоретических исследований установлены основные закономерности и критерии наступления предельного состояния узла в виде полого шара с отверстиями при многоосном нагружении усилиями в стержнях структурной конструкции. Получена методика расчета на прочность узла типа «БрГТУ» новой металлической структурной конструкции.

Рекомендации по использованию. Разработанный узел и методику его расчета и конструирования рекомендуется использовать в проектно-конструкторских организациях при проектировании большепролетных металлических структурных конструкций, а также в учебном процессе учреждений образования для подготовки специалистов строительных специальностей.

Область применения. Большепролетные покрытия уникальных объектов, покрытия промышленных и общественных зданий, проектно-конструкторские организации, строительные вузы.

RESUME

Nikolay Shalobyta

Stress and Strain State of Hollow Spherical Joint of New Metal Structural Element

Key words: a joint, a node, a structural element; stress and strain state, equivalent stress, numerical modeling, plasticity, local forces.

The purpose of the research. Design of a new joint in the shape of a hollow sphere having apertures and supporting washes under high-strength bolts. Development of a calculation method for its bearing ability.

Methods of research. The stress-strain analysis of a hollow thick-walled sphere having apertures under local load. The numerical modeling of a hollow thick-walled sphere with supporting washers of the node considering all possible loading by the local concentrated forces typical of such structural constructions. Laboratory tests of the joint specimen to analyze its ultimate limit state under multi-axial loading by local forces. In-place tests of a structural element with a new node applied.

The received results and novelty. The constructive design of the hollow spherical joint ("BSTU"-type) with apertures and supporting washers under high-strength bolts has been developed. On the basis of experimental and theoretical researches the basic laws and criteria of ultimate limit state of the hollow spherical joint with apertures under multi-axial loading in the structural elements have been established. The strength calculation method for the "BSTU"-type joint has been developed.

Recommended application. The newly-developed joint and its calculation and design methods are recommended for the use in design organizations to design wide-span metal structural constructions and also at educational establishments for the training of structure engineering specialists.

Fields of application: for wide-span roof structures of unique construction projects; for roof structures of industrial and public buildings; for the training process of structure engineering specialists at institutes of higher learning.

ШАЛОБИТА Николай Николаевич

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
УЗЛА ИЗ ПОЛОГО ШАРА НОВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 20.01.2009. Формат 60x84 $\frac{1}{8}$. Бумага «Снегурочка».
Гарнитура «Agiat». Усл. п. л. 1.4. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 84.

Отпечатано на ризографе Учреждения Образования
«Брестский государственный технический университет»

Лицензия ЛП №02330/0148711 от 30.04.2004.

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.