

2. Рекомендации по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации несущих стропильных конструкций «Талдом-Профиль»® из тонкостенных стальных оцинкованных профилей. – М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. – 86 с.
3. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль». – М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. – 69 с.
4. Design of steel structures. General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting: EN 1993-1-3, 2006. – 130 p.

УДК 624.012.45

**Шалобьта Н.Н.**  
(БрГТУ, г. Брест)

### **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ УЗЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА «БрГТУ» ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ НАГРУЗОК**

В Брестском государственном техническом университете была создана новая металлическая структурная конструкция, получившая название система «БрГТУ» (рис. 1), отличающаяся от известных структурных систем конструкцией узлового соединения и стержня структуры [1]. Узловой элемент «БрГТУ» в законченном изготовленном виде представляет собой полый толстостенный шар-сферу с отверстиями в стенке, в которые устанавливаются на сферических шайбах высокопрочные болты, имеющие возможность вкручиваться в специальные гайки трубчатых стержней [1]. Данный узловой элемент относится к наиболее технологичному типу узловых систем (комбинированному) и имеет ряд преимуществ, выгодно отличающих его от уже используемых [1].

Шар изготавливается из двух толстостенных полусфер, полученных путем горячего прессования из листового проката, которые свариваются стыковым швом с разделкой кромок, образуя цельное соединение, для которого сопротивление сварного шва выше сопротивления основного металла. Полусферы имеют отверстия для пропуска крепежных болтов, диаметром на 1,0 мм больше диаметра соответствующего болта. Узловой элемент в области отверстий снабжен подкрепляющими накладками в виде жестких шайб со сферическими поверхностями обращенными к шару, с

радиусами соответствующими внутреннему или наружному радиусам сфер. Со стороны полости шара через отверстия пропущены высокопрочные соединительные болты, которые свободно посажены в отверстия и имеют возможность свободно вращаться и поворачиваться на определенный угол, обеспечивая при этом возможность достаточно простого вкручивания в специальные гайки стержневых элементов структуры.

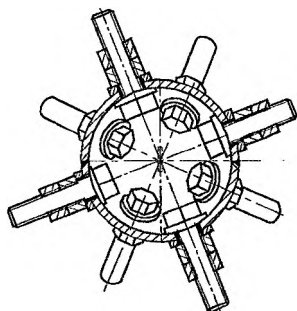


Рис. 1. Узловое соединение структурной системы «БргТУ»

Анализ конструкции узла «БргТУ» установил, что его несущая способность и деформативность обеспечиваются высокопрочными болтами и толстостенной сферической оболочкой.

Диаметр и марку стали высокопрочных болтов как и для большинства комбинированных узловых элементов назначается исходя из величины усилий, действующих в стержнях структурной конструкции, и может быть определен достаточно простыми и известными зависимостями, приведенных в нормативных документах [2, 3]. Полный шар с отверстиями в стенке является с точки зрения аналитического расчета очень сложной системой, в которой напряженно-деформированное состояние зависит от многих факторов: диаметра сферы, толщины его стенки, диаметра и мест расположения отверстий, характера приложения нагрузок и т.д.

Поэтому основными целями исследования явились выбор необходимых геометрических параметров сфер (толщины и радиуса) и определение достаточных размеров накладок для восприятия нагрузок.

Экспериментальное определение НДС толстостенной сферической оболочки при действии сосредоточенных сил.

Для оценки НДС толстостенной оболочки, для случая одноосного приложения нагрузки (растяжения-сжатия) проведены экспериментальные исследования на узловых элементах со следующими геометрическими характеристиками: внешний диаметр сферы 160 мм, внутренний 140 мм,

диаметр отверстий 25 мм. Внутренняя и наружные шайбы принимались диаметром 56 мм с внутренним отверстием в 25 мм. Измерения производились по наружной и внутренней поверхностям сферы с помощью тензометрии. Использовалась при измерениях тензометрическая система, состоящая из 52 малобазных проволочных петлевых пленочных тензорезисторов типа 2ГКП-10.100В ТУ 2506.1382, с базой 10 мм. Розетки тензодатчиков расположили таким образом, чтобы их направления соответствовали направлениям траекторий главных напряжений – меридиональных и кольцевых. Измерение максимальной деформации прогибов (выгибов) в полюсе сферы производились с помощью индикаторов часового типа ИЧ-0.001 (цена деления 0,001 мм).

В качестве критерия к оценке напряженного состояния сферы приняли эквивалентные напряжения в волокнах  $\sigma_{экв}$ , вычисляемые по гипотезе энергии формоизменения Рихарда Фон Мизеса по данным экспериментальных напряжений в меридиональном и кольцевом направлениях.

**Конечно-элементная модель для исследования напряженно-деформированного состояния узлов «БрГТУ»** (рис. 2). Полая сфера узлового элемента, находится в сложном напряженном состоянии. Экспериментальное определение особенностей напряженно-деформированного состояния во многом не позволяет полностью смоделировать расчетную ситуацию, а также определить конкретный уровень напряженности слоев оболочки. Поэтому проводилось численное моделирование, в частности, с использованием конечно-элементных моделей.

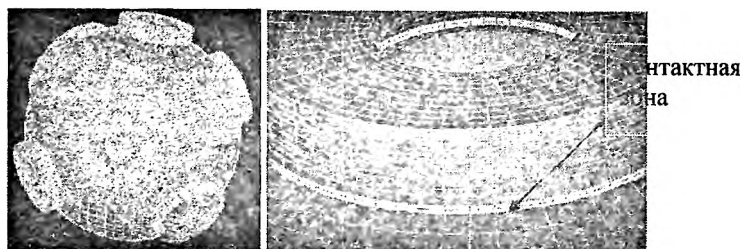


Рис. 2. Аналитическая конечно-элементная модель узла «БрГТУ»

В качестве метода решения задачи использовалось конечно-элементное моделирование с применением вычислительного пакета «MSC.visualNastran for Windows». В рамках данной статьи приведем результаты расчетов для определения напряженно-деформированного состояния приведенной выше толстостенной сферы узлового элемента при различных вариантах нагружений сосредоточенными силами: осесимметричном одноосном, двухосном осесимметричном и сложном.

Для построения конечно-элементной трехмерной модели применили твердотельное моделирование с использованием КЭ «Solid». Разбивка производилась с использованием твердотельных пространственных пяти- и шестигранных элементов «Solid» типа «Brick» («Брусоч») и «Wedge» («Клин»), со сторонами отвечающими линейной функции формы.

Размеры конечных элементов сферы узла устанавливались на основании разбивки в меридиональном и кольцевом направлениях, с углом в центре сферической системы координат в  $6^\circ$ . Аналогичным образом, но в цилиндрической системе координат по окружности была нанесена сетка КЭ в местах отверстий в сфере узла и конечно-элементная модель шайб, при этом угол разбивки на конечные элементы также составлял  $6^\circ$ . Толщина принятых КЭ не превышала 1 мм, что позволяло разбить толщину сферы не менее чем на 10 слоев (при ее толщине в 10 мм). Данный принцип построения позволил создать вдоль каждой направляющей в каждом ее слое по 60 конечных элементов приблизительно одинаковых размеров в наиболее интересующих нас зонах исследования.

Анализ напряженно-деформированного состояния сферы узла «БрГТУ» при симметричном одноосном растяжении.

Как показывают результаты экспериментальных данных, а также данные численных расчетов, максимальный уровень эквивалентных напряжений формируется на внешней поверхности сферы в месте сопряжения с жестким включением. При этом по границе подкрепляющего элемента узла – шайбы, формируется характерная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений, что наглядно представлено на рисунке 3 в виде характера изменения изополей эквивалентных напряжений.

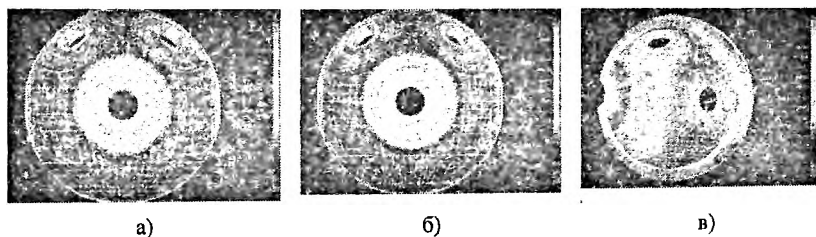


Рис 3. Изменение изополей распределения эквивалентных напряжений на внешней и внутренней поверхностях сферы в зависимости от уровня нагрузки: а – 120 кН, б – 180 кН; в – вид изнутри при 180 кН

На рисунке 4 приведены экспериментальные и численные графики изменения эквивалентных напряжений при нагрузке 100 кН. Начало координат совмещено с наружной гранью подкрепляющей шайбы  $r/R = 0,35$ ,

при этом не рассматриваем зону вокруг отверстия в сфере, где присутствует влияние краевых эффектов вблизи отверстий.

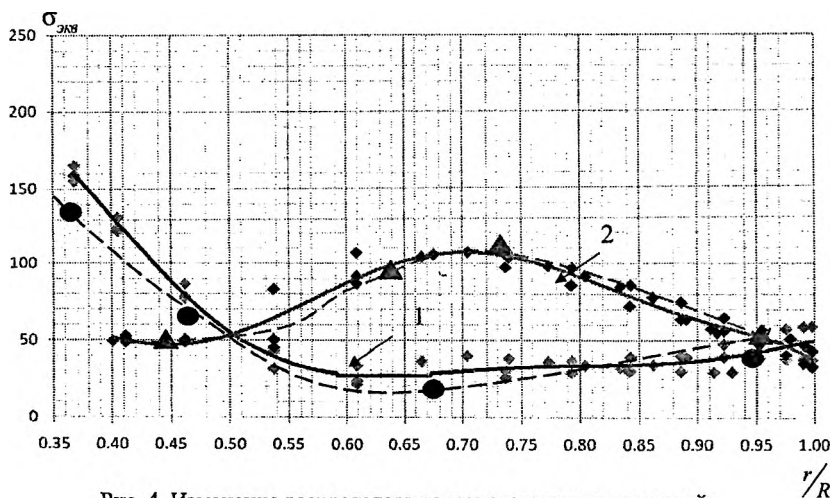


Рис. 4. Изменение распределения эквивалентных напряжений:

1 – на внешней поверхности; 2 – на внутренней поверхности

( $r$  – радиус кольцевых сечений;  $R$  – радиус сферы)

————— – численный расчет; - - - - - – экспериментальные данные

Из представленных графиков характерное изменение эквивалентных напряжений на внутренней и наружной поверхностях сферы, свидетельствует о наличии изгиба. Выделяется две характерные кольцевые зоны с высокими уровнями эквивалентных напряжений: на внешней поверхности по границе подкрепляющей шайбы и на внутренней поверхности в центральной зоне полусферы.




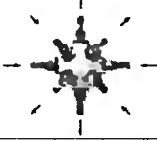
При одноосном нагружении максимальный уровень эквивалентные напряжения достигают на внешней поверхности оболочки у края площадки приложения нагрузки и составляют 165,15 МПа. По мере удаления от внешней границы контакта шайбы со сферой происходит резкое уменьшение значений эквивалентных напряжений на внешней поверхности. На участке длиной, соответствующей толщине сферы ( $h$ ), значение эквивалентных напряжений на внешней поверхности снижается практически вдвое и составляет 86,8 МПа, а на дистанции  $(1,5 - 1,7)h$  значение напряжений снижается до 35 – 50 МПа, что соответствует четверти от принятых максимальных напряжений на данном уровне нагружения.

Иначе распределяются напряжения на внутренней поверхности сферы. В начальной зоне длиной равной толщине сферы имеет место прибли-

зительно одинаковый уровень распределения эквивалентных напряжений, который составляет 48 – 52 МПа. Далее происходит постепенный рост эквивалентных напряжений. При  $r/R = 0,65 - 0,75$  имеет место второй пиковый уровень напряженности в сфере при котором значения эквивалентных напряжений достигают 106,3 МПа. По мере удаления к полюсу эквивалентные напряжения также снижаются до уровня 40 – 55 МПа.

**Численный анализ напряженно-деформированного состояния сферы узла «БргТУ» при сложном нагружении локальными сосредоточенными силами.** Произведя численное моделирование сложного приложения нагрузок и приняв вариант загрузки при одинаковом уровне сосредоточенных сил, установлено изменение эквивалентных напряжений опасных зон. Результаты численных расчетов сведены в таблицу.

Изменение эквивалентных напряжений опасных зон сферы

Вид нагружения	Схема нагружения	Значение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ , МПа	
		на внешней поверхности	на внутренней поверхности
		$r/R = 0,37$	$r/R = 0,65 - 0,75$
Двухосное симметричное растяжение		157,4	201,6
Двухосное растяжение-сжатие		168,2	151
Сложное многоосное нагружение		158,7	273,1
		167,12	212,12

Анализ взаимного влияния многоосного нагружения узла усилиями в поясах и раскосах показали, что эквивалентные напряжения на внешней поверхности сферы в первой опасной зоне имеют значения ниже или сопоставимые с данными, полученными при одноосном растяжении. В то же время эквивалентные напряжения во второй опасной зоне практически в 1,5 – 2 раза выше, чем при одноосном нагружении. При этом имеются принципиальное отличие в распределении по площади внутренней поверхности данных напряжений. Если при одноосном нагружении выделяется характерная кольцевая зона с одинаковым уровнем напряжений, то при многоосном нагружении по линиям, соединяющим точки приложения нагрузки, выделяются лишь локальные области с высоким уровнем напряженности. Установлено, что взаимно противоположные усилия (растяжение – сжатие) значительно (в 1,5 раза) разгружают внутреннюю зону напряженности, а сонаправленные усилия накладываются.

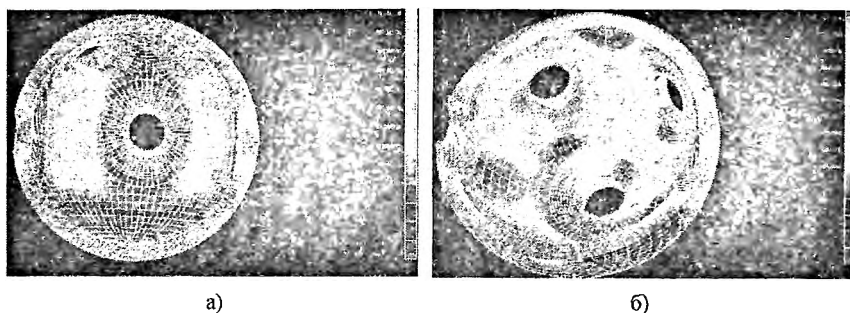


Рис. 5. Изополя распределения эквивалентных напряжений на внутренней поверхности сферы:  
а – двухосное симметричное растяжение; б – сложное многоосное

Чтобы выяснить влияние геометрических параметров накладок на величину напряженности сферы, было проведено численное моделирование различных видов нагружения сферы. В результате установлена зависимость, определяющая оптимальное отношение диаметра шайбы к радиусу сферы, при которой обеспечивается максимальная ее несущая способность при заданном уровне нагрузки.

### Литература

1. Драган, В.И. Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением «БрГТУ» / В.И. Драган, Н.Н. Шалобыга // Перспективы развития новых технологий в строительстве и

- подготовке инженерных кадров республики Беларусь: сб. ст. XIV международ. науч.-практ. семинара, Минск, 22 – 23 июня 2006 г.; ред. кол.: Т.М. Пецольд, Н.П. Блещик, Э.И. Батыновский (отв. ред.). – Минск: БНТУ, 2006. – Т. 2. – С. 133 – 138.
2. Нормы проектирования. Стальные конструкции: СНиП II-23-81\*. – М., 1991.
  3. Пособие по проектированию стальных конструкций к СНиП II-23-81\*.– М., 1989.
  4. Новожилов, В.В. К расчету оболочек на сосредоточенные воздействия / В.В. Новожилов, К.Ф. Черных // Исследования по упругости и пластичности. Изд-во ЛГУ. – 1963. – № 2.

УДК 624.012:691.328

**Латыш В.В.; Рак Н.А., канд. техн. наук, доц.**  
(БНТУ, г. Минск)

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА – ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ (МЕСТНОМ СРЕЗЕ)**

Расширение областей и объемов применения бетона в строительстве, ужесточение условий эксплуатации конструкций из него, требует постоянного совершенствования его физико-механических характеристик, а именно прочности, трещиностойкости, сопротивления ударным и динамическим воздействиям, абразивному износу.

Одним из перспективных конструкционных материалов в этом отношении является сталефибробетон (Steel fiber reinforced concrete (SFRC)), представляющий собой цементную матрицу, дисперсно-армированную хаотично расположенными или ориентированными стальными волокнами (фибрами).

Практика применения сталефибробетона в республике Беларусь пока очень ограниченная.

Одна из главных областей применения сталефибробетона в нашей стране – использование его при устройстве промышленных полов по грунту. Однако в настоящий момент стальную фибру в промышленных полах применяют наряду с обычной стержневой арматурой только для повышения устойчивости к абразивному износу и компенсации усадоч-