

Н.Н. ШАЛОБЫТА, Т.П. ШАЛОБЫТА

Брестский государственный технический университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА "БрГТУ"

В настоящей статье приводятся исследования геометрических параметров, позволяющих определить уровень максимальных нагрузок для сфер узловых элементов "БрГТУ" с точностью, достаточной для проектирования структурных конструкций.

В мировой строительной практике создано множество уникальных металлических структурных решетчатых систем покрытий зданий, отличающихся не только оригинальными архитектурными формами, но и прогрессивными конструкторскими решениями их исполнения, включающими как использованием различных конструкций стержневых элементов, так и узлов их сопряжения. Наибольшее распространение в металлических пространственных системах большепролетных покрытий получили трубные профили, поскольку труба является оптимальным сечением стержня, работающего на восприятие осевых усилий, а кроме того, при значительных ветровых нагрузках имеет минимальный коэффициент аэродинамического сопротивления. Из множества применяемых в практике строительства узловых соединений, пригодных для любых нагрузок по прочности, для объединения трубчатых профилей, в основном получили распространение комбинированные узлы систем "Меро" и "Веймар" (Германия), "МАрХИ" (Россия), "NS" (Япония), а также узловые сопряжения с использованием монтажной сварки "Октаплатт" (Германия) и "SDS" (Франция) [1, 4, 5] (рис. 1).

Проектирование эффективных большепролетных структурных покрытий, как правило, сдерживается рядом объективных причин, а именно: сложностью формообразования, в виду их уникальности в архитектурном и конструктивном исполнении, малой изученностью работы данных конструкций в реальных условиях, несовершенством имеющихся конструктивных решений узловых соединений стержневых элементов их высокой стоимостью и сложностью изготовления [1, 4], в совокупности с отсутствием проверенных и эффективных методик их расчета.

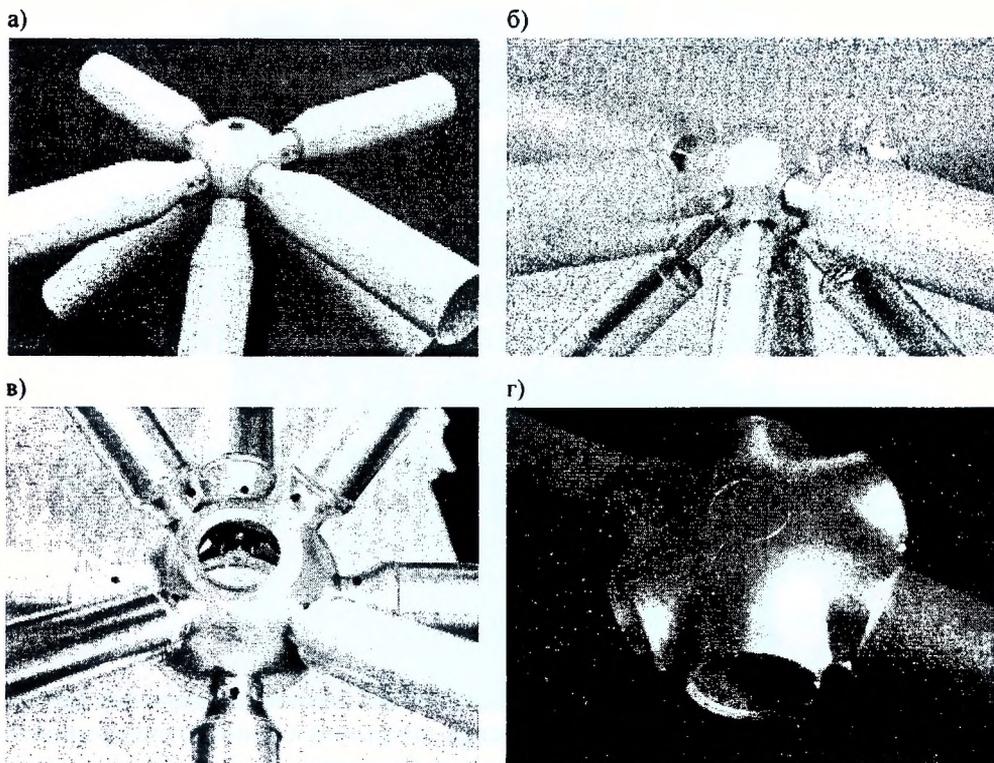


Рис. 1. Наиболее применяемые в строительстве узловые соединения: а) "Меро", б) "МАРХИ", в) "NS", г) "SDS"

Пригодность к эксплуатации пространственной структурной конструкции определяется несущей способностью и деформативностью стержней и узловых сопряжений. Большинство стержневых элементов достаточно просто рассчитываются по известным формулам, приведенным в нормативных документах [2, 3]. Для узловых соединений приходится выполнять сложные расчеты основываясь или только на упрощенных инженерных зависимостях, или производить дорогостоящие натурные испытания данных соединений или конструкции в целом. При этом, следует отметить отсутствие в отечественных и зарубежных нормативных документах по проектированию металлических конструкций каких либо рекомендаций по расчету узловых соединений, даже наиболее распространенных [4].

Конструктивное решение узлового соединения "БрГТУ"

В Брестском государственном техническом университете была создана новая металлическая структурная конструкция, получившая название система "БрГТУ", отличающаяся от известных структурных систем конструкцией узлового соединения и стержня структуры [1, 5]. 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 [5] (рис. 2). Шар изготавливается из двух полушфер, полученных путем горячего прессования из листового проката, соединенных стыковым швом с разделкой кромок. В полушферах имеются отверстия под крепежные (высокопрочные) болты, диаметром на 1,0 мм больше диаметра соответствующего болта. Высокопрочные болты пропущены со стороны полости шара через данные отверстия и имеют возможность свободного вращения вокруг собственной оси, что обеспечивает свободную сборку элементов решетки структуры. Болты снабжены двумя гайками: силовой и контргайкой, которые в проектном 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 [5].

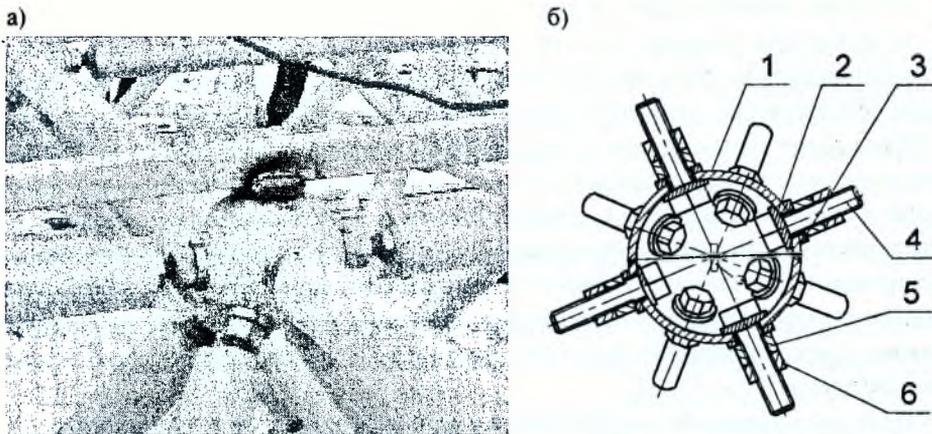


Рис. 2. Узел структурной конструкции типа "БрГТУ": а) общий вид, б) поперечный разрез: 1 - полусфера; 2 - внутренняя шайба с выпуклой поверхностью; 3 - наружная шайба с вогнутой поверхностью; 4 - болт; 5 - силовая гайка; 6 - контргайка

Данное узловое соединение относится к наиболее технологичному типу узловых систем - комбинированному, но имеет ряд новаторских конструкторских решений, выгодно отличающих его от используемых систем "Меро", "МАрХИ", "NS" [5]: выполнение отверстий в стенке полого шара диаметром, превышающим диаметр болтов, 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; применение под высокопрочные болты специальных шайб со сферическими, обращенными к шару поверхностями обеспечивает абсолютную центровку стержней на центр узла при закручивании силовой гайки, исключая появление эксцентриситетов и др.

Анализ конструкции узла "БрГТУ" установил, что его несущая способность и деформативность обеспечиваются высокопрочными болтами и толстостенной сферической оболочкой.

Диаметр и марка стали высокопрочных болтов, как и для большинства комбинированных узловых элементов, назначается исходя из величины усилий, действующих в стержнях структурной конструкции, и могут быть определены достаточно простыми и известными зависимостями, приведенными в нормативных документах [2, 3]. В узловом элементе типа "БрГТУ" высокопрочный болт рассчитывается только исходя из условия работы на восприятие растягивающих усилий и поэтому его прочность определяется по следующей зависимости [2, 3]:

$$N \leq R_{bh} A_{bn} \cdot \gamma_b \quad (1)$$

где:

R_{bh} - расчетное сопротивление растяжению высокопрочных болтов;

A_{bn} - площадь сечения болта нетто;

γ_b - коэффициент условий работы соединения [2].

Экспериментальное и численное определение НДС толстостенной сферической оболочки при действии сосредоточенных сил.

Определение несущей способности полой толстостенной оболочки с отверстиями связан с определенными сложностями как в теоретическом, так и расчетном планах. Полюй 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 ее стенки, диаметра и мест расположения отверстий, геометрических размеров подкрепляющих накладок (толщины и радиуса), характера приложения нагрузок и т.д. [4, 5].

В реальных условиях эксплуатации полая сфера узлового соединения, 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 наряду с экспериментальными исследованиями целесообразным в изучении является численное моделирование, в частности, с использованием конечно-элементных моделей.

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. Розетки тензодатчиков расположили таким образом, чтобы их направления соответ-

ствоvalи направлениям траекторий главных напряжений – меридиональных и кольцевых (рис. 3).

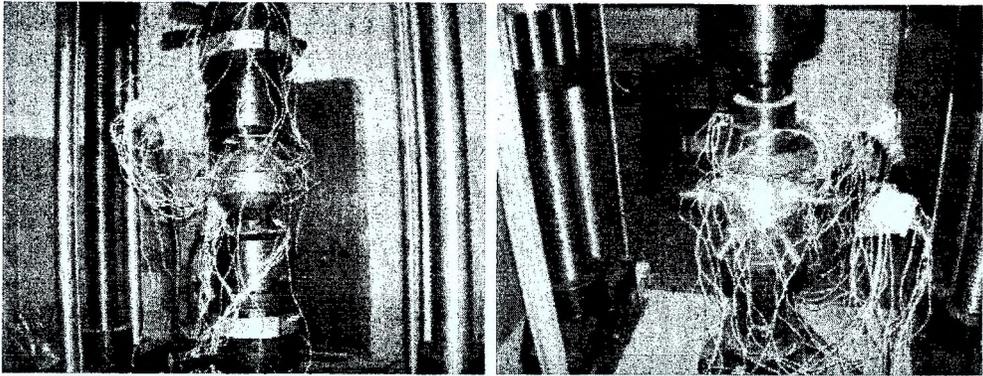


Рис. 3. Исследование напряженно-деформированного состояния сферы узла в условиях осевого растяжения

В качестве численного метода решения поставленной задачи использовалось конечно-элементное моделирование с применением вычислительного пакета "MSC.visualNastran for Windows" [4, 5]. Применение данного вычислительного комплекса позволило смоделировать ряд задач. В расчетной модели варьировались следующие параметры, как различные варианты загружений локальными нагрузками (одноосное, двухосное и сложное), геометрические размеры полый толстостенной сферы (толщина, радиус), размеры подкрепляющих шайб.

Для построения конечно-элементной трехмерной модели применили твердотельное моделирование с использованием КЭ "Solid" (рис. 4). Разбивка производилась с использованием твердотельных пространственных пяти- и шестигранных элементов "Solid" типа "Brick" ("Брусok") 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° . Аналогичным образом, но в цилиндрической системе координат по окружности была нанесена сетка КЭ в местах отверстий в сфере узла и конечно-элементная модель накладок, при этом угол разбивки на конечные элементы так же составлял 6° . Толщина принятых КЭ не превышала 1 мм, что позволяло разбить толщину сферы не менее чем на 10 слоев (при ее толщине в 10 мм). Для достоверной оценки прочности был произведен детальный анализ по нескольким критериям текучести: эквивалентным напряжениям по Губеру-Мизесу-Генки ($\sigma_{\text{эkv}}$); максимальным главным напряжениям (σ_1) и максимальным касательным напряжениям (τ_{max}).

Как показывают результаты экспериментальных данных, а так же данные численных расчетов при симметричном одноосном растяжении максималь-

ный 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 5 в виде характера изменения изополей эквивалентных напряжений.

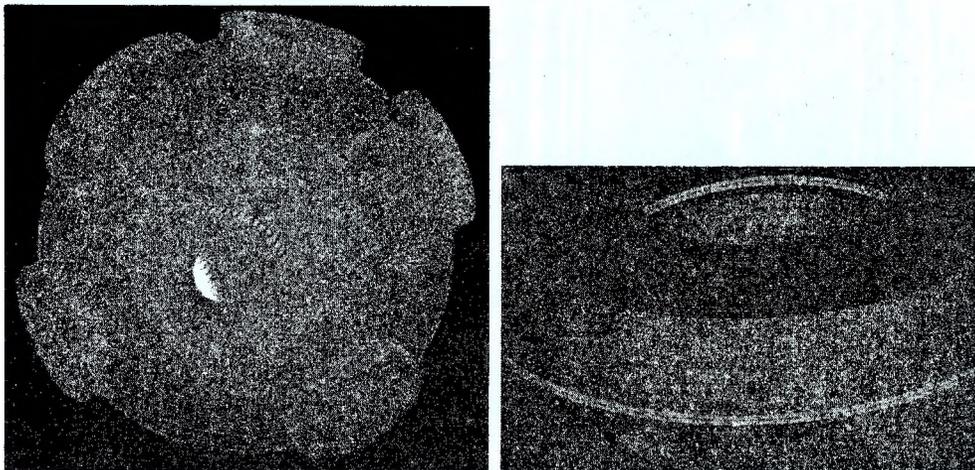


Рис. 4. Аналитическая конечно-элементная модель узла «БрГТУ»

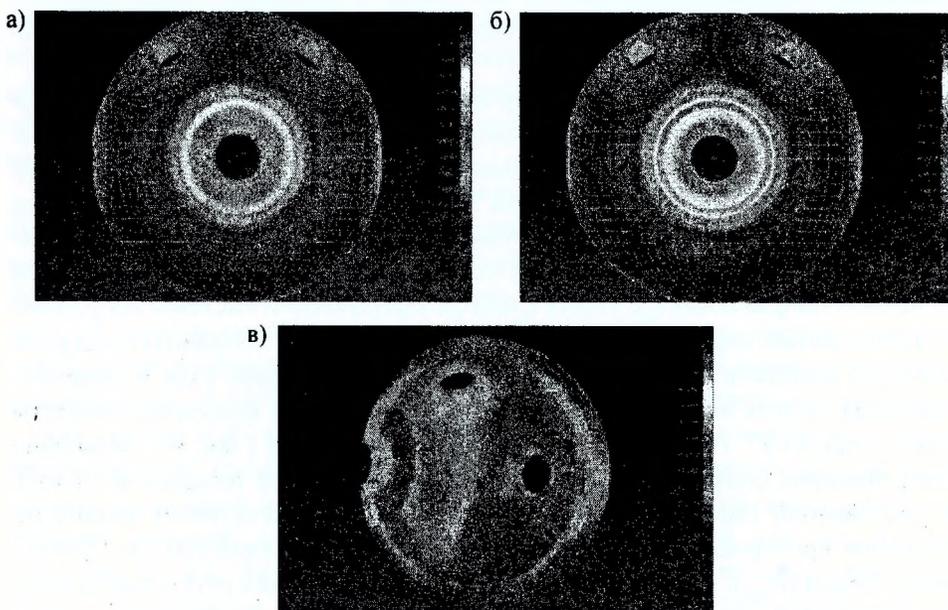


Рис. 5. Изменение изополей распределения эквивалентных напряжений на внешней и внутренней поверхностях сферы в зависимости от уровня нагрузки: а) 120 кН, б) 180 кН, в) вид изнутри при 180 кН

На рисунке 6 приведены экспериментальные и численные графики изменения эквивалентных напряжений при нагрузке 100 кН. Начало координат принято совпадающим с местом стыка оболочки с подкрепляющей шайбой $r/R = 0,35$, при этом не рассматриваем зону вокруг отверстия в сфере, где присутствует влияние краевых эффектов вблизи отверстий.

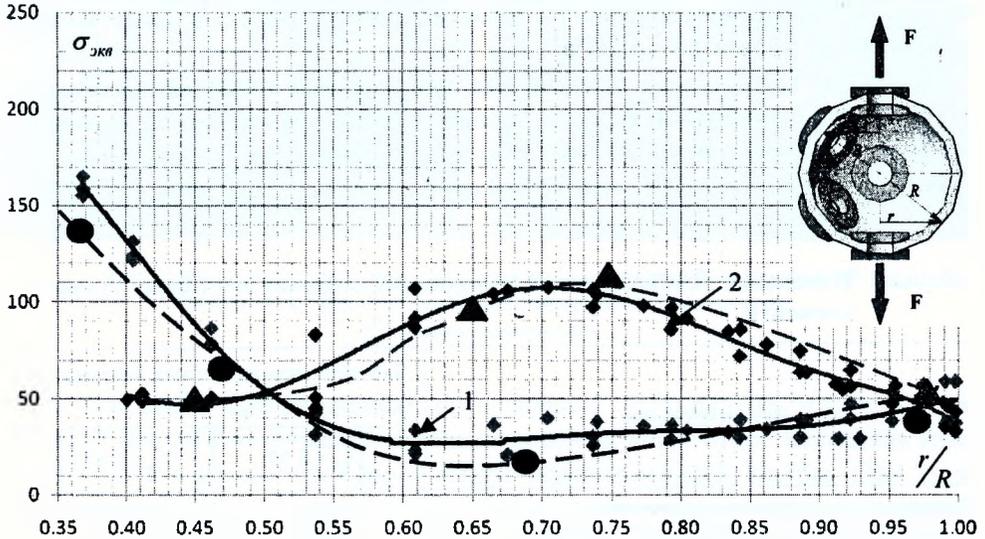


Рис. 6. Изменение распределения эквивалентных напряжений: 1) на внешней поверхности, 2) на внутренней поверхности; — — — численный расчет, — — — экспериментальные данные

Как видно, 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 приблизительно одинаковый уровень распределения эквивалентных напряжений, который составляет 48÷52 МПа. Далее происходит постепенный рост эквивалентных напряжений. При $r/R = 0.65 \div 0.75$ 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.

Произведя численное моделирование при сложном нагружении локальными сосредоточенными силами, приняв вариант загрузки при одинаковом уровне сосредоточенных сил, установлено изменение эквивалентных напряжений опасных зон. Результаты численных расчетов сведены в таблицу 1 [4].

Таблица 1. Изменение эквивалентных напряжений опасных зон сферы узлового элемента

Вид нагружения	Значение эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$, МПа	
	$r/R = 0.37$	$r/R = 0.65 \div 0.75$
Двухосное симметричное растяжение	157,4	201,6
Двухосное симметричное растяжение-сжатие	168,2	151
Двухосное симметричное растяжение с раскосами	158,7	273,1
Сложное многоосное	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 [3]. Установлено, что при двухосном растяжении при уровне локального усилия в перпендикулярной плоскости F_{\perp} не превышающего 0,53÷0,55 уровня усилия F , наиболее нагруженная область будет располагаться на ее внешней поверхности вокруг подкрепляющей шайбы. 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.

Анализ различных схем сложного нагружения толстостенной сферы локальными усилиями, возможными при реальной работе узла в составе структурной конструкции, выявил третью область, в которой эквивалентные напряжения могут принимать значения, превышающие уровень эквивалентных напряжений на внешней поверхности сферы по кромке шайбы. Область образуется на внутренних волокнах сферы в полюсе между четырьмя локальными силами

(рис. 7б). Данная ситуация возникает, когда сфера загружена локальными силами в раскосах, имеющими различное направление действия и при отношении меньшего из них к большему, превышающего значение $0,45 \div 0,50$.

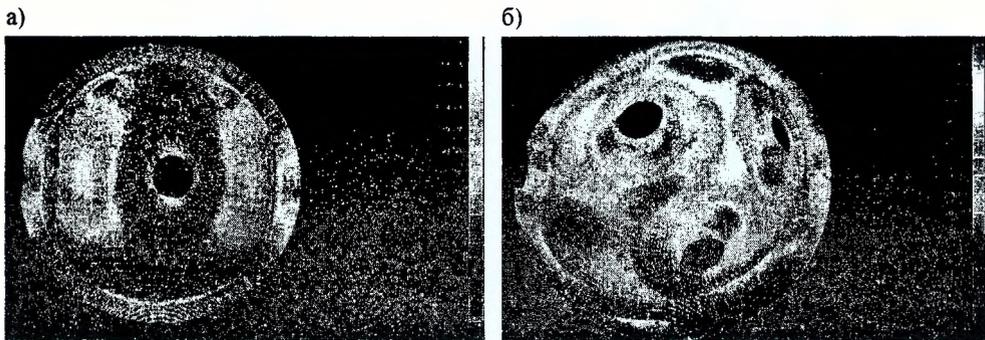


Рис. 7. Изополя распределения эквивалентных напряжений на внутренней поверхности сферы: а) двухосное симметричное растяжение, б) сложное многоосное

На основании произведенных исследований установлено, что при всех случаях сложного нагружения наиболее опасной зоной будет кольцевая зона на наружной поверхности сферы вокруг подкрепляющей шайбы. При этом уровень эквивалентных напряжений в данной зоне практически не зависит от схемы нагружения. Поэтому оценку несущей способности толстостенной сферы возможно производить в условиях одноосного растяжения или сжатия.

Чтобы выявить влияние геометрических параметров накладок на величину напряженности сферы, было проведено численное моделирование различных видов нагружения сферы и серия экспериментальных исследований при одноосном нагружении осесимметричной нагрузкой с варьированием геометрических размеров подкрепляющих шайб (толщины и радиуса). В результате установлена зависимость, определяющая оптимальное отношение диаметра накладки к радиусу сферы, при которой обеспечивается максимальная ее несущая способность при заданном уровне нагрузки.

Методика расчета на прочность и конструирования узла "БрГТУ"

Данные экспериментальных исследований и проведенные численные расчеты различных КЭ-моделей сфер основными напряжениями, определяющими напряженное состояние полой сферы, позволили установить, что меридиональные напряжения. В этом случае, при действии локальной силы F , направленной вдоль оси отверстия радиусом $r_{отв}$, подкрепленного шайбой радиусом $r_{ш}$, прилегающая к шайбе область оболочки подвержена действию изгибных напряжений [4, 5], распространяющихся вдоль меридиана на длину зоны крае-

вого эффекта, размер которого зависит от геометрического фактора оболочки $\sqrt{R \cdot h}$ (рис. 8).

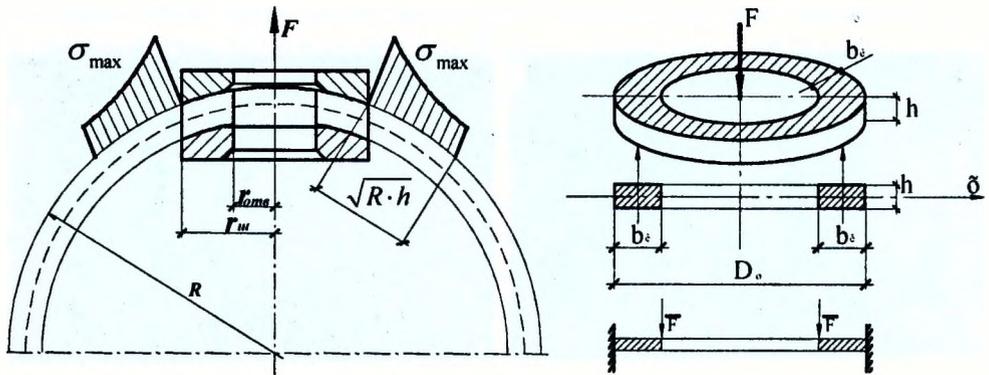


Рис. 8. Расчетная схема к определению усилий в оболочке

Принимая условную работу зоны краевого эффекта оболочки подобной работе кольцевой пластины на жестких опорах и считая ширину такого кольца b_c пропорциональной протяженности зоны краевого эффекта, по аналогии с напряженно-деформированным состоянием кольцевых пластин в первом приближении для определения максимальных нормальных напряжений в зоне краевого эффекта может быть использована следующая зависимость:

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

где:

γ - геометрический параметр, равный $\frac{\sqrt{R \cdot h} \cdot h^2}{r_u}$,

R - внешний радиус сферы,

r_u - радиус подкрепляющей шайбы.

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

$$F_{\max} = \frac{1}{k} \cdot \gamma \cdot R_y \cdot \gamma_c \quad (3)$$

Построив график зависимости $F_{\max} \sim \gamma$ (рис. 9), можно определить расчетное значение несущей способности узла в упругой области работы материала при заданных характеристиках материала и геометрических параметрах элементов узлового соединения (толщины и радиуса сферы, диаметра болтов, радиуса подкрепляющих шайб).

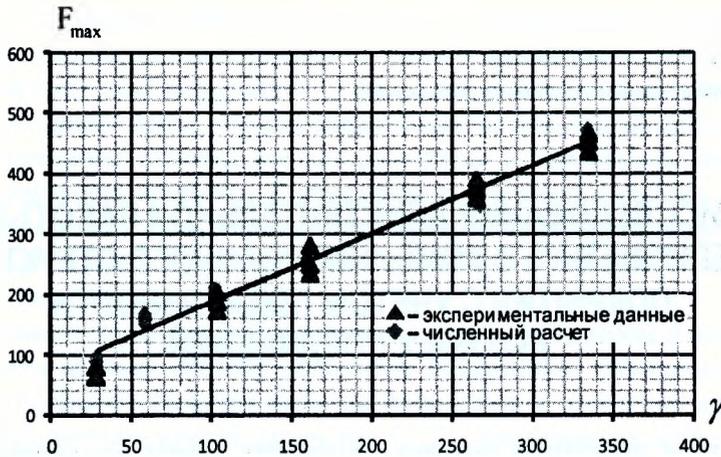


Рис. 9. Зависимость расчетной несущей способности узла от его геометрических параметров

Как показало сопоставление расчетных и экспериментальных данных, использование полученного геометрического параметра γ [5], позволяет определить уровень максимальных нагрузок для сфер узловых элементов "БрГТУ" с точностью, достаточной для проектирования структурных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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), 94-102.
- [2] СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции, М.: 1991.
- [3] Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*), М.: 1989.
- [4] Драган В.И., Шалобыта Н.Н., Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением "БрГТУ", Сборник статей XIV международного научно-практического семинара "Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь" (Минск, 22-23 июня 2006 г.). Ред. Коллегия: Т.М. Пецольд, Н.П. Блещик, Э.И. Батяновский (отв. ред.), БНТУ, Мн.: 2066. Том 2, 284 с.
- [5] Шалобыта Н.Н., Напряженно-деформированное состояние узла из полого шара новой металлической структурной конструкции: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, Брест 2009, 24 с.