

Прочностные свойства полых титановых сфер в условиях динамического нагружения

Ивашкин А.И., Комаров С.В.

Аннотация. Целью исследования является определение степени влияния скорости осадки и ориентации технологического сварного соединения на способность полой титановой сферы сопротивляться прилагаемой нагрузке.

Для достижения поставленной цели был выполнен анализ характера разрушения объекта исследования при различных условиях нагружения. Определено изменение диаметра и толщины стенки сферы при изготовлении; степень ослабления металла в зоне сварного соединения, изменение прочностных свойств сферы при увеличении скорости деформирования с 0,1 до 70 мм/с и изменении ориентации сварного соединения относительно направления усилия сжатия.

Объектом исследования является полая титановая сфера диаметром 72 мм и толщиной стенки 5 мм, полученная путем сварки в среде защитных газов из двух штампованных полусфер.

Результаты измерения геометрических параметров сфер показывают, что изменение толщины стенки полусфер при изготовлении не превышает 3,9%. Результаты испытаний плоских образцов сварных соединений показали, что значения временного сопротивления образца не выходят за пределы, установленные нормативно-технической документацией. Анализ изменений прочностных свойств полых титановых сфер позволяет сделать вывод о том, что максимальное значение прилагаемого усилия сжатия соответствует относительной деформации, равной 64-66%; при увеличении скорости осадки с 0,1 до 70 мм/с прочность увеличивается на 6-8%; ориентация сварного соединения относительно направления прилагаемой нагрузки незначительно влияет на прочност-

ные свойства сфер. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем механической защиты различных объектов.

Ключевые слова: полая сфера; титановый сплав ОТ4; динамическая защита.

INVESTIGATION OF STRENGTH PROPERTIES OF HOLLOW TITANIUM SPHERES DEPENDING ON THE UPSET RATE

Ivashkin A. I., Komarov S. V.

Abstract. The investigation is aimed at finding out the dependence of the upset rate and orientation of the preliminary weld on the load resistibility of the hollow titanium sphere.

The investigation included determination of changes in the sphere geometrics in the process of fabrication, the weld concavity, changes in the strength properties of the sphere due to the increased strain rate (from 0.1 mm/s up to 70 mm/s) and the weld orientation against the force direction, as well as an analysis of failures of the spheres.

The subject of the investigation is a hollow titanium sphere 72 mm in diameter with a 5 mm thick wall made of two press-formed hemispheres welded to each other in shielding gas.

The measurements of the sphere geometrics demonstrate a change in the wall thickness by not more than 4% in the process of fabrication and the absence of the weld concavity. The analysis of changes in the strength properties of the hollow titanium sphere brings us to the conclusion that the load resistance is a maximum at a strain of 64-66%, the strength increases by 6-8% with a growth of the upset rate, and the load resistibility is independent of the weld orientation. The obtained results can be used to develop shock absorbing systems for various objects.

Key words: hollow sphere; OT4 titanium alloy; shock absorber.

В настоящее время в качестве компонентов систем защиты от внешних механических воздействий используются различные материалы. Широкое применение в указанной области имеет древесина различных пород и металлы, кроме того, в литературе есть данные об исследовании полых сфер, изготовленных из композитного материала Nomex Aramid fiber/phenolic resin honeycomb компанией АТЕСА [1]. Указанные полые сферы способны выдерживать давление 0,35 МПа, однако в ряде задач при проектировании новых изделий этого недостаточно, например, при разработке динамической защиты для транспортных контейнеров массой порядка 10 000 кг.

В данной статье приведены результаты исследования прочностных свойств полых сфер, изготовленных из титанового сплава ОТ4 ГОСТ 19807-91 [2], в зависимости от скорости осадки, ориентации сварного соединения относительно направления приложения внешней нагрузки, а также анализ изменения геометрических параметров сфер при изготовлении. Для достижения цели исследования решаются следующие задачи:

- определение геометрических параметров сфер и их заготовок;
- определение степени ослабления металла в зоне сварного соединения;
- определение прочностных характеристик полых сфер в условиях динамического нагружения;
- определение влияния ориентации сварного соединения на прочностные свойства полых сфер.

Объектом исследования являлись 15 полых титановых сфер с номинальным диаметром 72 мм и толщиной стенки 5 мм. Выборка объектов исследования выполнялась случайным образом из 150 сфер, изготовленных из металла одной партии. Сфера изготовлена из двух полусфер, полученных методом холодной штамповки из листов титанового сплава ОТ4, и имеет одно неразъемное соединение, выполненное методом сварки в среде защитных газов по контуру прилегания деталей. При реализации технологического цикла возможно изменение размеров заготовок и сфер, поэтому до и после сварки регистрировали следующие параметры:

- диаметр полусферы;
- толщина стенки у свариваемой кромки;
- минимальная толщина стенки;
- диаметр сферы;
- масса сферы.

В результате измерений указанных параметров получено следующее:

- максимальное значение наружного диаметра полусфер составляет 71,6 мм, минимальное 71,2 мм, среднее 71,4 мм;
- максимальное значение толщины стенки у свариваемой кромки составляет 5,1 мм, минимальное 4,9 мм, среднее 5 мм;
- максимальное значение диаметра сферы составляет 71,8 мм, минимальное 71,3 мм, среднее 71,4 мм;
- максимальное значение массы сферы составляет 0,289 кг, минимальное 0,281 кг, среднее 0,285 кг.

Полученные данные свидетельствуют о максимальном разбросе внешних диаметров полусфер 0,4 мм, толщины стенки – 0,2 мм, диаметра сферы – 0,5 мм, массы сферы – 0,008 кг, что составляет соответственно 0,56%, 3,9% и 0,7% и 2,8% от максимальных значений. Указанными отклонениями в условиях поставленных задач можно пренебречь, поскольку допуск листового материала толщиной 5 мм составляет 9,2% (0,46 мм согласно ГОСТ 22178-76 [3]) и значительно превышает полученные отклонения.

Исследование степени ослабления металла в зоне сварного соединения выполняется на испытательной машине Insight-200 (относительная погрешность измерений 1,0%, максимальное разрывное усилие 200 кН) согласно методике, изложенной в ГОСТ 6996-66 [4]. Испытание выполняется на трех плоских образцах тип XII, XIII [4], изготовленных из партии металла для заготовок полусфер и с полным соответствием сварного соединения по типу шва, сварочным материалам и толщине листа сварному соединению титановой сферы.

Результаты внешнего осмотра плоских образцов после испытаний показали, что разрушение происходит вне зоны сварного соединения. Зафиксиро-

ванные в момент разрушения значения временного сопротивления составляют 81,8; 81,9; 82,2 кгс/мм², что находится в пределах 70-90 кгс/мм², установленных ГОСТ 22178-76. Таким образом, ослабление металла в зоне сварного соединения не происходит.

Испытания сфер на прочность проводят на испытательной машине MTS-810 (относительная погрешность показаний 1%, максимальное усилие 500 кН). Динамическое нагружение реализуется усилием рабочего элемента испытательной машины, перемещающегося со скоростью 0,1; 30 и 70 мм/с. Сварное соединение располагается под углом 0, 45 и 90° относительно направления силы сжатия. В процессе испытания контролируется усилие сжатия и деформация исследуемой сферы.

Условия испытаний титановых сфер (скорость перемещения рабочего элемента и ориентация сварного соединения) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия испытаний титановых сфер

Скорость перемещения рабочего элемента, мм/с	Угол ориентации сварного шва, градусов		
	0	45	90
0,1	Сфера №1, №2	Сфера №6, №7	Сфера №11, №12
30	Сфера №3	Сфера №10	Сфера №13
70	Сфера №4, №5	Сфера №8, 9	Сфера №14, №15

Результаты испытаний при скорости 0,1 мм/с в виде зависимости усилия сжатия от деформации титановых сфер приведены на рис. 1. На графике наблюдаются две явно выраженных области сопротивления прилагаемой нагрузке. Пик первой области образуется при перемещении рабочего элемента испытательной машины на 25-30 мм, что составляет 34,7-41,7% от диаметра сферы. Максимальное значение нагрузки второй области сопротивления реализуется при перемещении 46-48 мм (64-66% от диаметра сферы). Образование второго пика обусловлено возникающим контактом «полюсов» полый сферы при их вдавливании внутрь в процессе перемещения рабочего элемента. После пре-

одоления пиковой зоны второй области сопротивления происходит резкий спад усилия сжатия, свидетельствующий о разрушении полой сферы, что зафиксировано при внешнем осмотре, и потере ею способности сопротивляться прилагаемой нагрузке.

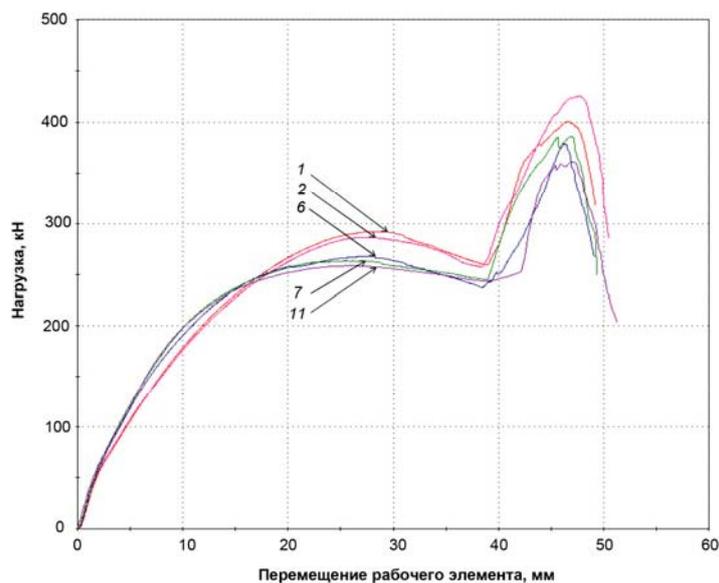


Рис. 1. Зависимость усилия сжатия от величины деформации сферы при скорости сжатия 0,1 мм/с (цифрами обозначены номера сфер, см. табл.1)

Аналогичный характер имеет зависимость усилия сжатия от величины деформации сфер при скоростях 30 и 70 мм/с (см. рис. 2 и 3).

Максимальное значение усилия сжатия в первой области составило 292,2 кН (сфера №1) при расположении сварного соединения под углом 0°, минимальное – 258,6 кН (сфера №11) при угле 90°. Среднее усилие составило 237,7 кН. Разброс значений усилия сжатия не превышает 11,5%. Принимая во внимание значение допуска на листовую прокат 9,2%, можно сделать вывод о соизмеримости полученных отклонений и незначительности влияния ориентации сварного соединения на прочностные свойства сфер.

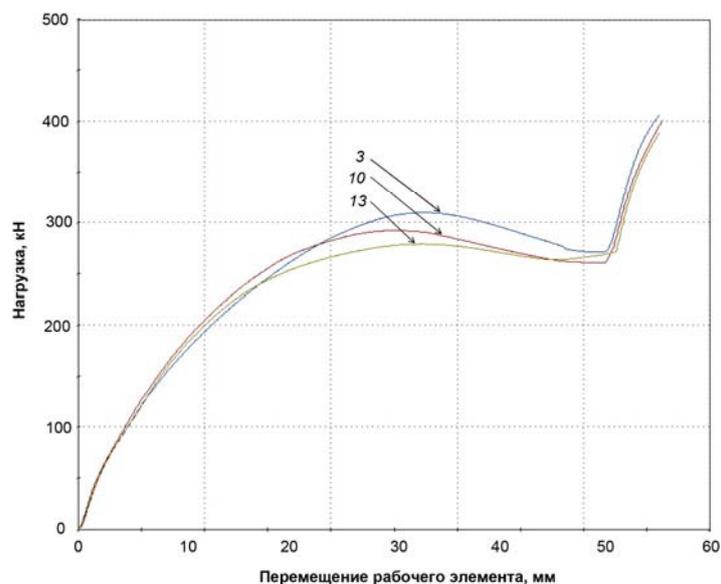


Рис. 2. Зависимость усилия сжатия от величины деформации сферы при скорости сжатия 30 мм/с (цифрами обозначены номера сфер, см. табл.1)

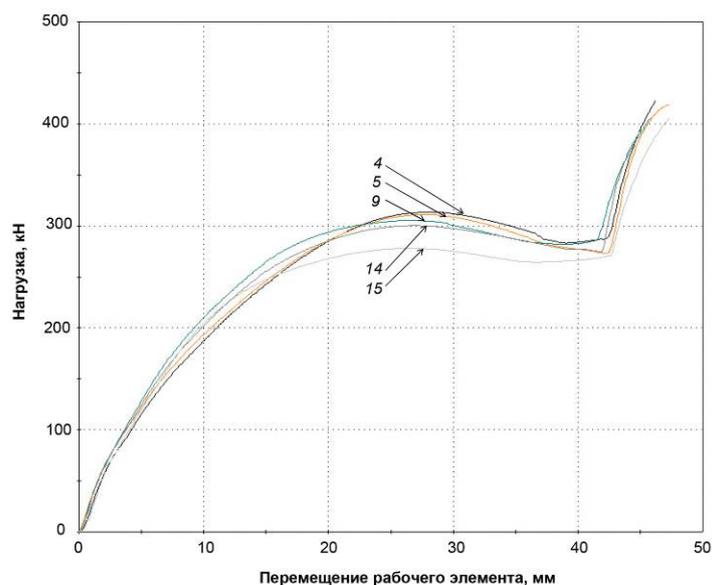


Рис. 3. Зависимость усилия сжатия от величины деформации сферы при скорости сжатия 70 мм/с (цифрами обозначены номера сфер, см. табл.1)

На рис. 2 и 3 не наблюдается явного пика второй области сопротивления сжатию, поскольку испытательная машина имеет собственную систему безопасности и снимает прилагаемое усилие в случае возникновения возможности соударения рабочих элементов. На диаграмме зависимости усилия сжатия от величины деформации сфер №№ 5 и 9 (см. рис. 3) можно увидеть завершение

«роста» усилия сжатия, т.е. наблюдается завершение образования второй области сопротивления.

Сопоставляя характер деформации всех образцов, с достаточной уверенностью можно констатировать, что кривые всех образцов имеют пик сопротивления при уровне деформации 45-48 мм (64-66%).

При увеличении скорости с 0,1 до 70 мм/с при ориентации сварного соединения под углом 0° наблюдается увеличение максимального значения усилия сжатия первой области сопротивления на 18,9 кН (6,1 %), второй области – на 17,5 кН (4,2 %). Аналогичные результаты для первой области наблюдаются и при других ориентациях сварного соединения, а именно, при 45° – 41,9 кН (13,7 %), при 90° – 41,5 кН (13,8 %), что объясняется кинематическим упрочнением материалов. Ориентация сварного соединения незначительно влияет на увеличение сопротивления сжатию с увеличением скорости деформирования.

Осмотр полых сфер после испытаний позволяет сделать заключение о локализации очагов разрушения при различных скоростях деформирования. В первую очередь разрушение металла поллой сферы для всех случаев нагружения происходит в зоне, наиболее удаленной от оси сжатия (см. рис. 4). Далее трещины распространяются преимущественно по направлению проката металла (см. рис. 5).



Рис. 4. Зона первоочередного разрушения металла



Рис. 5. Направление распространение трещин

Анализ полученных диаграмм и внешнего вида титановых сфер после испытаний позволяет выделить еще одну закономерность, которая заключается в концентрации напряжений в зоне контакта «полюсов» и последующим разрушением металла сферы в этой зоне.

Описанные выше закономерности разрушения с небольшими отклонениями наблюдаются при всех рассмотренных вариациях скорости сжатия и ориентации сварного соединения относительно направления силы сжатия. Стоит отметить более равномерный характер разрушений при скоростях 30 и 70 мм/с по сравнению со скоростью 0,1 мм/с. Это объясняется более резким переходом энергии пластической деформации в тепловую энергию за счет сокращения времени теплоотдачи в окружающую среду.

В результате проведенных исследований получено следующее:

- утонение стенки полусферы при изготовлении методом холодной штамповки не превышает 3,9%;
- разрушение плоского сварного образца происходит вне зоны сварного соединения;
- сопротивление полой сферы сжатию незначительно зависит от ориентации сварного соединения;
- первая область сопротивления полой сферы реализуется на уровне нагрузки 260-290 кН при скорости 0,1 мм/с и 275-315 кН при скорости 70 мм/с;

- вторая область, образованная в результате контакта «полюсов», реализуется на уровне нагрузки 360-400 кН при скорости 0,1 мм/с и 405-425 кН при скорости 70 мм/с;
- максимальное сопротивление сферы прилагаемой нагрузке реализуется при относительной деформации 64-66%;
- областью локализации очагов разрушений является зона полой титановой сферы, наиболее удаленная от оси сжатия.

Заключение. Проведены испытания полых титановых сфер, изготовленных методом сварки штампованных полусфер. Измерение размеров сфер в процессе изготовления и испытания плоских образцов сварных швов подтверждают качество изготовления. Влияние ориентации сварного соединения к направлению прилагаемой нагрузки на прочностные свойства сфер незначительно. Полые сферы из титанового сплава ОТ4 рекомендуются к использованию в качестве демпфирующего элемента систем механической защиты.

Библиографический список:

1. Rahme Pierre, Bouvet Christophe, Rivallant Samuel, Fascio Valia, Valembois Guy. Mechanical protection for composite structures submitted to low energy impact. In: *ECCM14 - 14th European Conference on Composite Materials*, 07-10 June 2010, Budapest, Hungary.
2. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.
3. ГОСТ 22178-76. Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия.
4. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

References:

1. Rahme Pierre, Bouvet Christophe, Rivallant Samuel, Fascio Valia, Valembois Guy. Mechanical protection for composite structures submitted to low energy

impact. In: *ECCM14 - 14th European Conference on Composite Materials*, 07-10 June 2010, Budapest, Hungary.

2. GOST 19807-91. Titan i splavy titanovye deformiruemye [Wrought titanium and titanium alloys. Grades].

3. GOST 22178-76. Listy iz titana I titanovykh splavov. Tekhnicheskie usloviya [Titanium and titanium alloys sheets. Specifications].

4. GOST 6996-66. Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [Welded joints. Methods of mechanical properties determination].

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ивашкин Александр Игоревич, инженер-конструктор

ООО Научно-производственная фирма «Сосны»

ул. Славского д. 5а, г. Димитровград, Ульяновская область, 433506, Россия

e-mail: iai@sosny.ru, iai.sosny@gmail.com

Комаров Сергей Владимирович, директор Димитровградского филиала ООО НПФ «Сосны»

ООО Научно-производственная фирма «Сосны»

ул. Славского д. 5а, г. Димитровград, Ульяновская область, 433506, Россия

DATA ABOUT THE AUTHOR

Alexander I. Ivashkin, Design Engineer,

R&D Company “Sosny”

5a Slavsky Street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, 433506, Russian Federation

e-mail: iai@sosny.ru, iai.sosny@gmail.com

Sergey V. Komarov, Director of Dimitrovgrad Office,

R&D Company “Sosny”

5a Slavsky Street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, 433506, Russian Federation