

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ПОЛЮСА НА ПРОЧНОСТЬ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Ю. П. Мещеряков

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mail: director@sibexplo.com

Численно изучается напряженно-деформированное состояние в элементах переменной толщины несферической оболочки, возникающее при импульсном воздействии. Исследовано влияние радиусов вставок, используемых в качестве усиливающих элементов, на величину напряжений в несферических днищах. Изучена зависимость напряженно-деформированного состояния в полюсе оболочки от радиуса вставок. Показано, что использование вставки оптимального радиуса позволяет создать равнопрочную взрывную камеру.

Ключевые слова: прочность, несферическая оболочка, численное моделирование, импульсная нагрузка.

DOI: 10.15372/PMTF20170322

Введение. Для локализации опасных последствий взрыва используются взрывные камеры, основным элементом конструкции которых являются герметичные оболочки. Среди оболочек различного типа, предназначенных для локализации импульсных нагрузок, наиболее широкое распространение получили несферические оболочки, как правило, состоящие из цилиндрической оболочки и несферических днищ [1]. Такие оболочки, имеющие ряд важных технологических преимуществ по сравнению со сферическими оболочками, в то же время имеют бóльшую массу, что обусловлено неравномерностью распределения напряжений даже в случае равномерного нагружения за счет эффекта “раскачки”. При этом согласно результатам теоретических и экспериментальных исследований [2–5] наиболее нагруженными элементами оказываются днища, а максимальные напряжения, определяющие ресурс камеры, достигаются в их полюсах. Одним из способов уменьшения максимальных напряжений и получения более равномерного распределения напряжений во всех элементах оболочки является применение днищ переменной толщины. Наиболее простым и экономичным способом увеличения прочности днищ представляется увеличение их толщины в области полюса с помощью вставок. При этом важной задачей является определение радиуса вставки известной толщины, обеспечивающего наиболее равномерное распределение напряжений в элементах оболочки.

В данной работе в рамках модели линейной упругости численно исследовано напряженно-деформированное состояние элементов оболочки с днищами переменной толщины. Задача решалась методом конечных элементов без учета массовых сил.

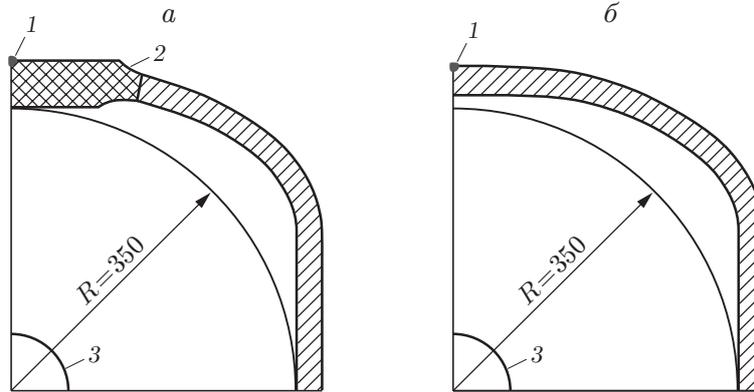


Рис. 1. Схемы оболочки со вставкой (а) и оболочки постоянной толщины (б): 1, 2 — точки, в которых в зависимости от радиуса усиливающей вставки могут иметь место глобальные экстремумы эквивалентных напряжений, 3 — заряд

1. Постановка задачи и метод решения. В рамках теории линейной упругости нестационарное симметричное напряженно-деформированное состояние описывается системой уравнений [6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, & \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial z}, & \sigma_{rr} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{u}{r}, & \sigma_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right). \end{aligned}$$

Здесь ρ — плотность; σ_{zz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rz} — компоненты тензора напряжений; u , w — компоненты вектора смещения \mathbf{D} ; постоянные Ламе λ , μ связаны с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν соотношениями

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

На рис. 1 показаны схемы оболочки со вставкой и оболочки постоянной толщины, а также схемы их нагружения. Глобальный экстремум для оболочки постоянной толщины расположен в полюсе (точка 1 на рис. 1, б). В случае оболочки со вставкой глобальный экстремум может находиться в точке 1 или 2 в зависимости от радиуса усиливающей вставки.

Для верификации результатов численного моделирования размеры оболочки были приняты максимально близкими к размерам оболочки взрывной камеры [5], предназначенной для локализации взрывчатого вещества массой 0,2 кг в тротиловом эквиваленте. В соответствии с [5] толщина оболочки принята равной 35 мм, толщина усиливающей вставки — 60 мм. Радиус вставки варьировался в диапазоне $r = 20 \div 130$ мм, внутренний радиус оболочки равен 0,35 м, расстояние от геометрического центра до полюса на внутренней поверхности оболочки составляет 0,35 м в случае оболочки со вставкой и 0,365 м в случае оболочки постоянной толщины. Расчет проводился с учетом осевой симметрии оболочки. Модуль Юнга полагался равным $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³. Эти значения соответствуют упругим константам стали. Приняты следующие начальные условия при $t = 0$: вектор смещения $\mathbf{u} = 0$, компоненты тензора напряжений $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rz} = 0$.

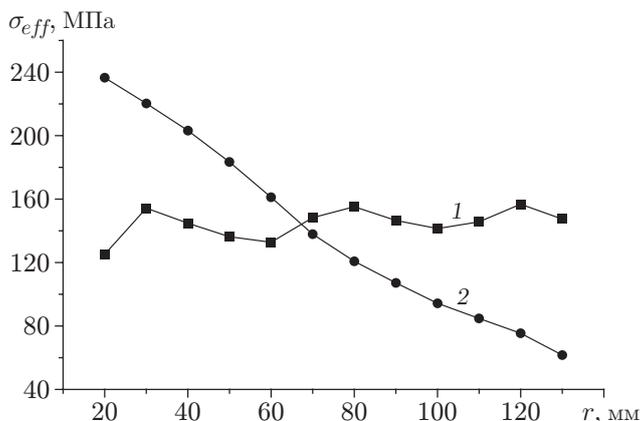


Рис. 2. Зависимости максимальных значений эквивалентных напряжений в полюсе вставки (1) и в точке сопряжения (2) от радиуса усиливающей вставки

На торцах оболочки ставились граничные условия симметрии, на внешней поверхности оболочки задавалось давление $P = 0$. На внутренней поверхности оболочки задавалось давление $P = 32$ МПа в интервале времени $0 < t < 20$ мкс и $P = 0$ при $t > 20$ мкс, что соответствует импульсной нагрузке, которую испытывают оболочки в результате воздействия взрывной волны [5].

Численные расчеты выполнены с помощью модифицированного метода конечных элементов [7], основанного на применении вариационного принципа Журдена для сплошной среды [8].

2. Результаты численного моделирования. На рис. 2 представлена зависимость максимальных значений эквивалентных напряжений в полюсе оболочки со вставкой от радиуса усиливающей вставки (кривая 1). Видно, что данная зависимость имеет периодический характер. Амплитуда колебаний эквивалентных напряжений относительно положения равновесия с увеличением радиуса вставки уменьшается. При этом с уменьшением радиуса вставки максимальные и минимальные значения амплитуды колебаний максимальных эффективных напряжений в полюсе вставки практически не меняются. Периодическая зависимость максимальных эффективных напряжений от радиуса вставки обусловлена колебаниями вставки как присоединенной массы. Максимальные и минимальные значения амплитуд эквивалентных напряжений в полюсе вставки соответствуют моментам, когда фазы колебаний днища и вставки совпадают. Увеличение жесткости системы вставка — днище камеры приводит к уменьшению амплитуды ее колебаний, а следовательно, и напряжений во всей вставке, в том числе в ее полюсе. Таким образом, можно ожидать, что при уменьшении радиуса вставки будет увеличиваться разность максимальных и минимальных напряжений в полюсе вставки. Такая зависимость подтверждается данными расчетов.

Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от радиуса вставки в точке сопряжения оболочки и вставки приведена на рис. 2 (кривая 2). Видно, что с увеличением радиуса вставки эффективные напряжения в точке сопряжения монотонно уменьшаются. Зависимость скорости изменения эффективных напряжений от радиуса вставки является периодической. Длина волны этой зависимости совпадает с длиной волны периодической зависимости максимальных эффективных напряжений от радиуса вставки в ее полюсе (кривая 1 на рис. 2) и при указанных выше параметрах камеры составляет приблизительно 40 мм. Монотонный характер зависимости максимальных эквивалентных напряжений от радиуса вставки в точке сопряжения оболочки и вставки свидетельствует о том, что

упругие колебания днища, максимальная амплитуда которых достигается в полюсе, оказывают более существенное влияние на величину максимальных напряжений во вставке, чем колебания самой вставки.

Абсцисса точки пересечения кривых 1 и 2 на рис. 2 соответствует оптимальному значению радиуса вставки. При уменьшении радиуса вставки относительно оптимального значения максимальные эффективные напряжения в точке сопряжения увеличиваются, причем эти напряжения больше максимальных эффективных напряжений в полюсе вставки. При увеличении радиуса вставки относительно оптимального значения максимальные эффективные напряжения в точке сопряжения уменьшаются, причем эти напряжения меньше эффективных напряжений в полюсе вставки. При указанных выше параметрах камеры оптимальный радиус вставки равен 68 мм. При этом максимальные эффективные напряжения в точке сопряжения и в полюсе вставки равны и составляют 144 МПа. Поскольку рассчитанное максимальное эквивалентное напряжение в полюсе днища постоянной толщины приблизительно равно 250 МПа, максимальная кратность уменьшения напряжений в днище равна $250/144 \approx 1,7$, что соответствует отношению толщины вставки к толщине оболочки.

Проведено сравнение результатов численных расчетов, полученных с использованием описанной выше методики, с экспериментальными данными, приведенными в работе [5]. Согласно полученным в работе [5] результатам тензометрирования при радиусе вставки, равном 120 мм, максимальные значения напряжений в полюсе и точке сопряжения составляют 137 и 86 МПа соответственно. Расчетные значения максимальных напряжений, полученные при том же радиусе вставки, составляют 156 МПа в полюсе и 75 МПа в точке сопряжения. Таким образом, несмотря на некоторые различия размеров, характеристик материалов и условий нагружения реальной и моделируемой оболочек взрывной камеры, различие рассчитанных и измеренных значений не превышает 15 %.

Заключение. В работе численно решена задача оптимизации величины радиусов вставок, свариваемых в оболочку взрывной камеры. Установлено, что при уменьшении радиуса вставки максимальные напряжения в точке ее сопряжения монотонно возрастают. В полюсе оболочки максимальные и минимальные напряжения остаются практически постоянными. Обнаружено, что существует единственная точка пересечения кривых зависимостей максимальных эффективных напряжений от радиуса вставки. Абсцисса этой точки определяет оптимальный радиус усиливающей вставки. Для взрывной камеры, в которой отношение толщины вставки к толщине оболочки равно $60/35 \approx 1,7$, использование вставки оптимального радиуса позволяет уменьшить максимальные эквивалентные напряжения во столько раз, во сколько толщина вставки превышает толщину оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shtertser A., Stoyanovskii O., Zlobin B., et al. Designing and manufacturing of explosion chambers for scientific research and explosive working of materials // Arch. Metallurgy Materials. 2014. V. 59. P. 1631–1636.
2. Adishchev V. V., Kornev V. M. Calculations of the shells of explosion chambers // Combust., Explos., Shock Waves. 1979. V. 15, N 6. P. 780–784.
3. Абакумов А. И., Егунов В. В., Иванов А. Г. и др. Расчетно-экспериментальное исследование деформации оболочек взрывных камер // ПМТФ. 1984. № 3. С. 127–130.
4. Sil'vestrov V. V., Plastinin A. V., Gorshkov N. N., Stoyanovskii O. I. Reaction of real explosion chamber to internal pulsed loading // Combust., Explos., Shock Waves. 1994. V. 30, N 2. P. 228–234.

5. Мещеряков Ю. П., Пикаревский А. А., Стояновский О. И. Расчет максимальных напряжений в полюсах взрывной камеры для сварки взрывом при условиях реального нагружения // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. 2010. № 5. С. 56–65.
6. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наук. думка, 1972.
7. Мещеряков Ю. П. Численное моделирование процесса резки облученных тепловыделяющих сборок // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 134–140.
8. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. Фриз. М.: Мир, 1981.

Поступила в редакцию 31/V 2016 г.
