УДК 629.584

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПРОЧНОГО КОРПУСА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.В. Пикуль

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток

Предложен расчетный метод оптимального подкрепления отверстий в сферической оболочке. Получена расчетная формула, позволяющая определять размеры цилиндрического подкрепления, устраняющего концентрацию напряжений в сферической оболочке прочного корпуса подводного аппарата. Предложены формулы для проверки прочности и устойчивости цилиндрического подкрепления отверстий. Даны рекомендации по подкреплению серии отверстий в сферической оболочке, располагаемых вблизи друг от друга.

ВВЕДЕНИЕ

Для связи аппаратуры, располагаемой в прочном корпусе подводного аппарата, с источниками энергии, приборами и прочим оборудованием приходится в прочном корпусе делать отверстия [1]. Отверстия ослабляют прочный корпус, вызывая концентрацию напряжений, вследствие чего напряжения в окрестности отверстия оболочки прочного корпуса могут увеличиться во много раз. Для уменьшения концентрации напряжений отверстие подкрепляют комингсом, зачастую увеличивая толщину оболочки. Применительно к малогабаритным прочным корпусам подводных аппаратов модульной конструкции [2] отверстия выполняют в полусферических оконечностях прочного корпуса. Ниже решается задача оптимального подкрепления центрального отверстия в сферической оболочке, при котором концентрация напряжений устраняется полностью.

1. Решение задачи устранения концентрации напряжений

Для устранения концентрации напряжений в районе центрального выреза оболочки сферической формы подберем подкрепление, которое полностью компенсирует вырезаемую часть оболочки по силовому воздействию и перемещениям. Ограничимся изотропными оболочками с цилиндрическим подкреплением, изготовленным из того же материала, что и оболочка. Для малых отверстий, у которых образующие внешней поверхности цилиндрического подкрепления составляют с центральной осью выреза углы не более 18°, с достаточной точностью вырез в сферической оболочке можно считать центральным ($\cos 18^\circ = 0{,}95$ и проекции всех сил и площадей будут иметь погрешность не превышающую 5 %). Силовое воздействие сферической оболочки на подкрепление примем в виде равномерного давления на его внешнюю поверхность. Это позволит вместо приближенных методов сопротивления материалов использовать точные решения теории упругости.

Применительно к изотропным сферическим и цилиндрическим оболочкам, загруженным наружным и внутренним давлением, точные решения теории упругости получены еще в 1852 г. французским ученым Г. Ламе [3].

Для сферической оболочки, загруженной внешним давлением, точные формулы имеют вид:

- напряжения в сечении предполагаемого центрального выреза целой оболочки:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = -\frac{(2r^3 + R_1^3)R_2^3}{2r^3(R_2^3 - R_1^3)}q;$$

$$\sigma_{33} = -\frac{(r^3 - R_1^3)R_2^3}{r^3(R_2^3 - R_1^3)}q, \qquad (1)$$

где σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} – меридиональные, окружные и радиальные напряжения; q – внешнее давление; R_1, R_2, r – внутренний, внешний и текущий радиусы,

- перемещение поверхности выреза сферической оболочки в направлении нормали к боковой поверхности цилиндрического подкрепления:

$$\Delta r_2 = = -\left(1 - 2\nu + \frac{1+\nu}{2}\frac{R_1^3}{R^3}\right)\frac{q r_2 R_2^3}{(R_2^3 - R_1^3)E}, \tag{2}$$

где E, ν – модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона; r_2 – внешний радиус цилиндрического подкрепления;

- внутренние силы в сечении предполагаемого выреза целой оболочки, определенные интегрированием уравнений (1) по толщине оболочки:

$$N_{11} = N_{22} = -\frac{qR_2^2}{2R}, \tag{3}$$

где N_{11}, N_{22} – меридиональные и окружные силы.

Для оболочек средней толщины, у которых $h^2/R^2 \le 0{,}05$, формула (2) с погрешностью в 5 % приводится к виду:

$$\Delta r_2 = -\left[(1-\nu)(1-0{,}5h/R) - \nu\, h/R\right]\frac{q r_2 R}{2Eh}. \tag{4}$$

Для цилиндрических оболочек при боковом давлении точные формулы теории упругости записываются в виде:

- напряжения:

$$\sigma_{11} = 0; \quad \sigma_{22} = -\left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right)\frac{p r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}; \quad \sigma_{33} = -\left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right)\frac{p r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \tag{5}$$

где σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} – продольные, окружные и радиальные напряжения; r_1, r_2, r – внутренний, внешний и текущий радиусы; p – внешнее боковое давление;

- радиальные перемещения внешней поверхности:

$$\Delta r_2 = -\left[1 - \nu + (1+\nu)\frac{r_1^2}{r_2^2}\right]\frac{p r_2}{(1 - r_1^2/r_2^2)E}. \tag{6}$$

Внешнее боковое давление на цилиндрическое подкрепление определим из условия равномерного распределения окружной силы N_{22} по образующей внешней поверхности цилиндрического подкрепления:

$$p = \frac{qR_2^2}{2Rb}, \tag{7}$$

где b – полная высота цилиндрического подкрепления, учитывающая толщину сферической оболочки.

В результате сопоставления формул (4) и (6) при учете равенства (7) находится следующее соотношение:

$$\left(\frac{1 + r_1^2/r_2^2}{1 - r_1^2/r_2^2} - \nu\right)\frac{1}{b} = \left(1 - \nu - \frac{1+\nu}{2}\frac{h}{R}\right)\frac{1}{h(1+h/R)}. \tag{8}$$

В случае, когда коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, соотношение (8) приводится к формуле:

$$\left(\frac{1 + r_1^2/r_2^2}{1 - r_1^2/r_2^2} - 0{,}3\right)\frac{1}{b} = \left(0{,}7 - 0{,}65\frac{h}{R}\right)\frac{1}{h(1+h/R)}. \tag{9}$$

Формула (9), как и более общее соотношение (8), позволяет подобрать цилиндрическое подкрепление отверстия в сферической оболочке, устраняющее концентрацию напряжений в оболочке (рис. 1). Формула справедлива для малых отверстий, у которых внешний радиус цилиндрического подкрепления не превышает 0,309 радиуса срединной поверхности сферической оболочки: $r_2 \le 0{,}309R$.

Расчеты по формуле (9) показывают, что масса цилиндрического подкрепления превышает массу вырезанного в оболочке материала приблизительно в 4 раза, если за вырез принять внутреннее отверстие цилиндрического подкрепления, или в 2 раза, если за вырез считать пересечение оболочки внешней поверхностью подкрепления.

2. Проверка прочности и устойчивости цилиндрического подкрепления отверстия

После подбора геометрических параметров цилиндрического подкрепления необходимо проверить его на прочность и устойчивость.

Прочность проверяется по 3-й теории прочности. С учетом запаса прочности в 30% для проверки прочности предлагается формула:

$$1{,}3\frac{qR_2^2}{(1 - r_1^2/r_2^2)bR} \le \sigma_{02}, \tag{10}$$

где σ_{02} – условный предел текучести материала подкрепления.

Проверка устойчивости производится по формуле для кольца. С учетом запаса

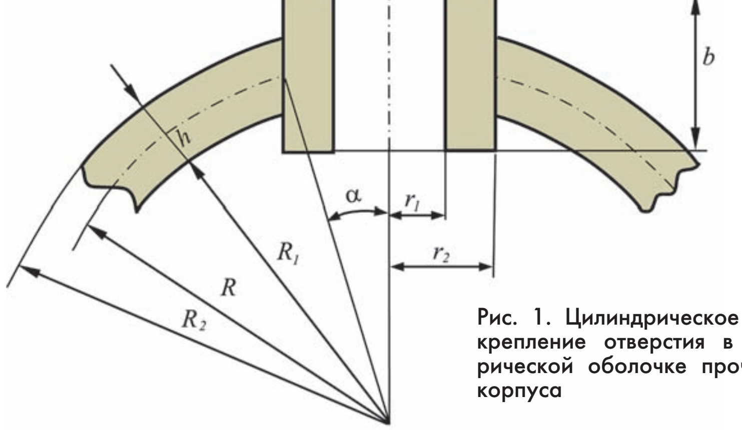

Рис. 1. Цилиндрическое подкрепление отверстия в сферической оболочке прочного корпуса

устойчивости в 30% для проверки устойчивости предлагается формула:

$$2{,}6\frac{(1-r_1/r_2)^3 bR}{(1+r_1/r_2)^2 R_2^2}E \le q. \qquad (11)$$

3. Рекомендации по подкреплению серии отверстий

Часто в сферической оболочке прочного корпуса приходится делать несколько отверстий. Исходя из технологических соображений серию близко располагаемых отверстий целесообразно подкреплять общим подкреплением, размещая отверстия друг от друга на минимально возможном расстоянии. По рекомендации Морского Регистра РФ минимальное расстояние между отверстиями равняется 2,5 суммарного размера их радиусов. Для серии отверстий одинакового диаметра, располагаемых на одинаковом расстоянии друг от друга, центры отверстий расположатся на окружности, радиус которой ρ_0 определится следующей формулой:

$$\rho_0 = \frac{2{,}5}{\pi} n r_1, \qquad (12)$$

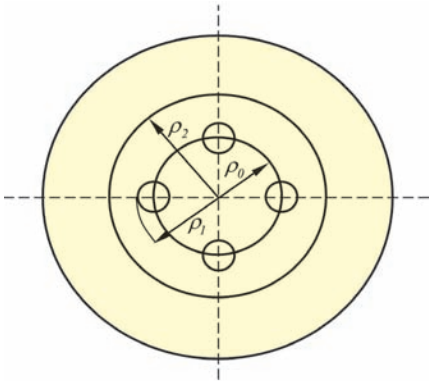

Рис. 2. Подкрепление серии отверстий общим утолщением сферической оболочки

где n – количество отверстий; r_1 – внутренние радиусы отверстий.

На рис. 2 представлено общее подкрепление для четырех одинаковых отверстий в виде утолщения оболочки до высоты b цилиндрического подкрепления одиночного отверстия (см. рис. 1). Окружность утолщения определится по формуле:

$$\rho_2 = \rho_0 + r_2. \qquad (13)$$

После определения размеров подкрепления рекомендуется произвести проверку прочности и устойчивости сферической оболочки с подкреплением, используя стандартные пакеты программ для решения трехмерных уравнений теории упругости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена расчетная формула для определения размеров цилиндрического подкрепления отверстий, которое устраняет концентрацию напряжений в сферической оболочке прочного корпуса подводного аппарата. Формула справедлива для малых отверстий, у которых внешний радиус цилиндрического подкрепления не превышает 0,309 радиуса срединной поверхности сферической оболочки: $r_2 \le 0{,}309\,R$.

Предложены расчетные формулы для проверки прочности и устойчивости цилиндрического подкрепления отверстия в сферической оболочке прочного корпуса подводного аппарата. Формулы обеспечивают запасы прочности и устойчивости подкрепления в 30%.

На основе полученных расчетных формул и требований Морского Регистра РФ разработаны рекомендации по оформлению общего подкрепления для нескольких отверстий, близко располагаемых друг от друга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диомидов М.Н., Дмитриев А.Н. Подводные аппараты (проектирование и конструкция). Л.: Судостроение, 1966. 364 с.
2. Автономные необитаемые подводные аппараты / Под общ. ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 272 с.
3. Lame G. Lecons sur la Theorie Mathematique de l'Elasticite des Corps Solides. Paris: Gauthier – Villars, 1852.