

**Численное моделирование локально нагруженных через подкрепляющие шпангоуты трехслойных с пенопластовым наполнителем стеклопластиковых цилиндрических оболочек****Шиврин Матвей Витальевич***Выпускник (специалист)*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Специальное машиностроение, Москва, Россия*E-mail: shivrinm@mail.ru*

Рассматривается стеклопластиковая конструкция в виде трехслойной с пенопластовым наполнителем цилиндрической оболочки, подкрепленной двумя одинаковыми торцевыми шпангоутами, один из которых находится под действием двух локальных радиальных или двух локальных осевых нагрузок. Численное решение соответствующих задач о напряженно-деформированном состоянии осуществляется как с применением конечно-элементной (КЭ) модели в рамках программного комплекса "Abaqus", так и модели, основанной на численном интегрировании уравнений построенной на гипотезе ломаной линии [1] теории тонких трехслойных оболочек с легким несжимаемым по толщине наполнителем (ЧИ модели). При построении соответствующей КЭ модели несущие слои оболочки представляются в виде ансамблей, составленных из оболочечных элементов, а шпангоуты и наполнитель - в виде ансамблей из объемных элементов. В ЧИ модели шпангоуты (имеющие прямоугольное поперечное сечение) рассматриваются как оболочки, подчиняющиеся гипотезе единой нормали, а численное интегрирование дифференциальных уравнений обозначенных теорий оболочек осуществляется в рамках алгоритма ортогональной прогонки [2].

Построенная КЭ модель (в отличие от ЧИ модели) обладает возможностью адекватно учитывать сжимаемость наполнителя по толщине. С помощью этой модели можно также осуществить переход к случаю несжимаемого по толщине наполнителя, задавая высокое значение его модуля Юнга  $E_3$  по толщине (вместо реального значения  $E_3=20$  МПа, задавая фиктивное  $E_3=2 \times 10^4$  МПа). Таким образом, эта модель может быть использована для оценки погрешностей, допускаемых при расчете напряженно-деформированного состояния рассматриваемого типа локально нагруженных конструкций на основе теории трёхслойных оболочек с лёгким несжимаемым по толщине наполнителем. Полученные с помощью описанной методики результаты применительно к рассматриваемым задачам прочности состоят в следующем.

По всем параметрам деформированного состояния используемые КЭ и ЧИ модели (при  $E_3=2 \times 10^4$  МПа) приводят к практически совпадающим результатам, что подтверждает их достоверность. Установлено, что в зоне стыка оболочки со шпангоутом (в случае радиальных нагрузок) имеет место краевой эффект, обусловленный изгибом каждого из несущих слоёв оболочки и составляющий по протяженности несколько толщин несущего слоя [3,4]. Выполненные для этого случая (при  $E_3=20$  МПа) КЭ расчёты показали, что учёт сжимаемости наполнителя приводит к повышению пиковых значений меридиональных деформаций несущих слоёв примерно на 15%.

Установлено также, что в случае осевых нагрузок, протяженность зоны резкого изменения меридиональных деформаций в зоне стыка оболочки со шпангоутом оценивается величиной порядка трёх толщин трёхслойного пакета, что в пять раз превышает аналогичный показатель, зафиксированный в случае с радиальными силами. В данном случае

реализуется тип краевого эффекта, когда несущие слои оболочки изгибаются (в меридиональном направлении) не по отдельности, а в составе трёхслойного пакета как единого целого [3,4]. Сказанное подтверждается фактом практического совпадения результатов расчётов на основе ЧИ и КЭ моделей (с принятием  $E_3=20$  МПа в КЭ модели).

#### Источники и литература

- 1) Григолюк Э.И. Уравнения трехслойных оболочек с лёгким наполнителем // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1957. № 1. С.77-84.
- 2) Кармишин А.В., Лясковец В.А., Мяченков В.И., Фролов А.Н. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.
- 3) Раман Э.В. Анализ краевых эффектов в трехслойных цилиндрических оболочках // В сб.: Труды МВТУ № 475. Расчет тонкостенных оболочечных конструкций. М., 1987. С. 4-12.
- 4) Сухинин С.Н., Носова З.М. Некоторые неклассические осесимметричные задачи трехслойных композитных оболочек // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2008. № 3(150). С. 4-10.