

УДК 539.3

Совместное влияние схем выкладки слоев и геометрических начальных несовершенств на устойчивость при осевом сжатии слоистых композитных цилиндрических оболочек

Ашравзянова Анна Антоновна^(*)

tmitaynina@gmail.com

SPIN-код: 3969-2837

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. Изложены результаты численного решения задач устойчивости при осевом сжатии применительно к двум принятым к рассмотрению образцам слоистых композитных цилиндрических оболочек и даются сравнения с имеющимися экспериментальными данными. Решения осуществляются с использованием трех конечно-элементных моделей, реализованных в среде программного комплекса ABAQUS. Это две модели, ориентированные на решение обозначенной задачи в геометрически нелинейной формулировке и в рамках линейной эйлеровой (бифуркационной) формулировки с учетом и без учета начальных несовершенств. Представляемые расчетные результаты демонстрируют эффекты, связанные с совместным влиянием схем выкладки слоев и геометрических начальных несовершенств на устойчивость рассматриваемых образцов.

Ключевые слова: устойчивость при осевом сжатии, слоистая композитная цилиндрическая оболочка, начальные несовершенства, метод конечных элементов

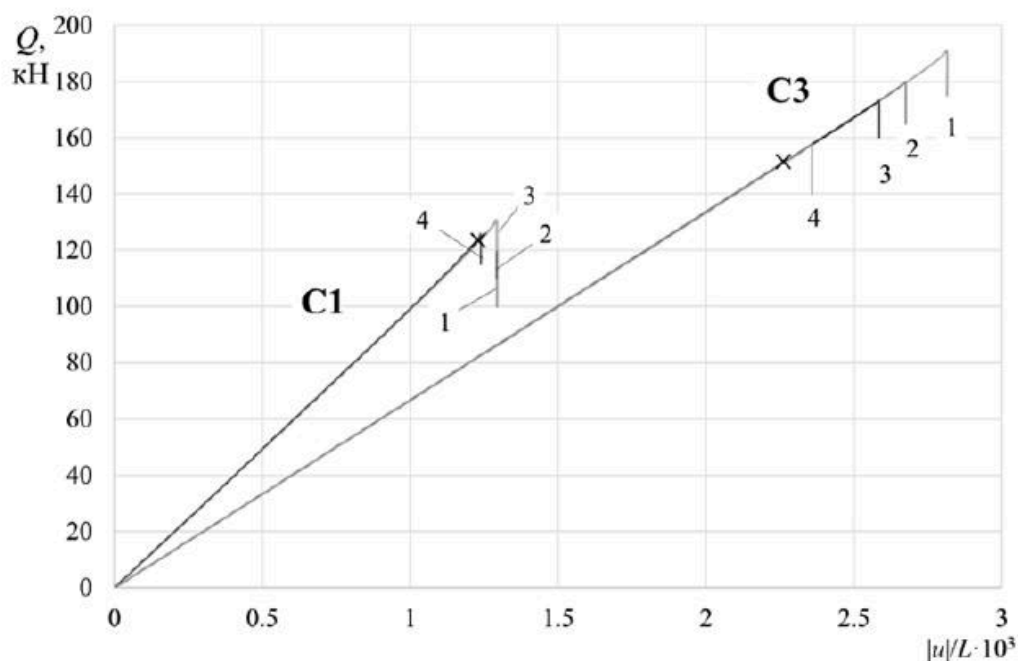
Введение. Выполненные из слоистых композитных материалов цилиндрические оболочки все чаще применяются в конструкциях изделий ракетно-космической техники в качестве корпусных силовых элементов [1]. Использование подобного типа оболочек позволяет разработчикам путем надлежащего подбора толщин слоев и направлений укладки армирующих их волокон находить такие конструктивные варианты, которые в рамках заданных габаритных размеров обеспечивали бы требуемую несущую способность с одновременным удовлетворением заданных требований по массе проектируемого объекта [2]. Одним из основных расчетных случаев для таких оболочек, является случай осевого сжатия, который требует проведения расчетов на устойчивость под действием большой величины осевой сжимающей нагрузки. Известно также, что на несущую способность (устойчивость) рассматриваемого типа оболочек существенное влияние оказывают начальные геометрические несовершенства (малые отклонения от идеальной круговой цилиндрической формы). Цель настоящей работы состоит в исследовании совместного влияния начальных геометрических несовершенств и направлений укладки армирующих волокон на устойчивость при осевом сжатии слоистых композитных цилиндрических оболочек.

Методы и материалы; результаты. Итак, рассмотрим два восьмислойных углепластиковых цилиндрических (длиной $L = 355,6$ мм и радиусом $R = 203,2$ мм) образца С1 и С3 со схемами выкладки слоёв вида: С1:

$[\mp 45^\circ/0^\circ_4/\pm 45^\circ]$, СЗ: $[\mp 45^\circ/0^\circ/90^\circ_2/0^\circ/\pm 45^\circ]$, находящихся под действием осевой сжимающей нагрузки Q . Номинальные значения характеристик упругости соответствующего препрега при этом имеют вид: $E_1 = 127553$ МПа, $E_2 = 11307$ МПа, $G_{12} = 5998$ МПа, $\nu_{12} = 0,3$, $t = 0,127$ мм [3].

В среде программного комплекса ABAQUS на основе оболочечного элемента S4 строим необходимые для проведения расчетных исследований конечно-элементные модели. Это модель КЭ-1, предназначенная для линейного бифуркационного анализа (как без учета, так и с учетом начальных несовершенств) и модель КЭ-2, которая способна в геометрически нелинейной постановке (с учетом начальных несовершенств, характеризуемых амплитудой A) решать задачу о деформации образца, находящегося под действием осевой сжимающей нагрузки. Кроме того, строим процедуру, позволяющую внести изменения (аналитически задаваемые начальные несовершенства) в исходную форму кругового цилиндра рассматриваемого образца.

Соответствующие принятым вариантам амплитуды (A [мм] = 0; 0,5; 1; 2) начального несовершенства расчетные (на основе модели КЭ-2) результаты по критическим нагрузкам $Q_{кр}$ представлены в виде графиков (см. рисунок), отражающих зависимости нагрузки Q от перемещения u нагружаемого торца образца. Момент достижения возрастающей (в условиях увеличения перемещения торца) нагрузкой соответствующего критического значения отмечен на графиках вертикальным спадом (с указанием номера соответствующего варианта амплитуды A , № 1 соответствует $A = 0$ мм). Экспериментально полученное (в рамках испытаний на осевое сжатие каждого из образцов) значение критической нагрузки $Q_{кр}$ представлено на графиках крестиком.



Графики полученных расчетом на основе модели КЭ-2 зависимостей $Q = Q(|u|)$ для четырех вариантов амплитуд начального несовершенства

Исходя из представленных на графиках С1 и С3 (см. рисунок) расчетных и экспериментальных данных, приходим к выводу, что образец С3, характеризующийся высоким расчетным значением критической нагрузки (№ 1), не демонстрирует такие же высокие показатели в эксперименте. Это указывает на его повышенную чувствительность к начальным несовершенствам. При этом образец С1, соответствующее расчетное и экспериментальное значение которого меньше, чем у образца С3, оказывается мало чувствительным к начальным несовершенствам. Проведенное сравнение наглядно демонстрирует эффект влияния схемы выкладки слоев у композитных цилиндрических оболочек на их чувствительность к начальным несовершенствам в условиях осевого сжатия.

Закключение. В среде программного комплекса ABAQUS на основе оболочечного элемента S4 построены необходимые для проведения расчетных исследований конечно-элементные (КЭ-1 и КЭ-2) модели. С использованием этих моделей проведены расчетные (в сопоставлении с экспериментом) исследования по устойчивости отличающихся лишь схемой выкладки слоев образцов С1 и С3 композитных (углепластиковых) цилиндрических оболочек. При этом описание имеющихся геометрических несовершенств у этих образцов осуществлено в виде аналитической зависимости, характеризующейся амплитудой A . Полученные проведенными параметрическими исследованиями (с изменением амплитуды A) результаты отражают эффекты совместного влияния схем выкладки слоев и геометрических начальных несовершенств на устойчивость при осевом сжатии рассматриваемых композитных образцов.

Список источников

- [1] Rudd M.T., Eberlein D.J., Waters W.A., Gardner N.W., Schultz M.R., Bisagni C. Analysis and validation of a scaled, launch-vehicle-like composite cylinder under axial compression. *Composite Structures*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116393>
- [2] Полилов А.Н. *Экспериментальная механика композитов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 373 с.
- [3] Hilburger M.W., Nemeth M.P., Starnes J.H. *Shell buckling design criteria based on manufacturing imperfection signatures*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citation/20040077039> (accessed 20.10.2025).