

УДК 539.3: 519.876.5

Моделирование несущей способности тонкостенных цилиндрических оболочек с несовершенством формы

А. М. Мильцин, В. И. Олевский, В. В. Плетин
Національний горний університет, Україна
ТД Днепропетровского завода сварочных материалов

Представлена методика и результаты комплексного экспериментального изучения процесса потери устойчивости неоднородно нагруженных овально-конических оболочечных конструкций методом многофакторного структурно-экстраполяционного анализа (МСЕА). Показана возможность увеличения несущей способности оболочек при осевом сжатии путем увеличения амплитуды несовершенств в определенном диапазоне их изменения.

Ключевые слова: структурно-экстраполяционный анализ, многофакторный эксперимент, овально-конические оболочки, несовершенства, несущая способность.

Представлена методика і результати комплексного експериментального вивчення процесу втрати стійкості неоднорідно навантажених овально-конічних оболонкових конструкцій методом багатофакторного структурно-екстраполяційного аналізу (МСЕА). Показано можливість збільшення несучої здатності оболонок при осьовому стисненні шляхом збільшення амплітуди недосконалостей в певному діапазоні їх зміни.

Ключові слова: структурно-екстраполяційний аналіз, багатофакторний експеримент, овально-конічні оболонки, недосконалості, несуча здатність.

Here are outlined the technique and results of a comprehensive experimental study and modeling of the process of stability loss of inhomogeneously loaded oval-conical shell structures using multivariate structural and extrapolation analysis (MSEA). The possibility of increasing the carrying capacity of shells is shown with increasing amplitudes of imperfections in a certain range of their changes while axial compression.

Key words: structural extrapolation analysis, multivariate experiment, oval-conic shell, imperfection, bearing capacity.

1. Общая постановка задачи и её актуальность

Разработка конструкций современных машин связана с необходимостью учета влияния большого числа факторов, формирующих их конечные характеристики и определяющие оценки надежности и долговечности. Особое место при этом занимают тонкостенные оболочки, конечные характеристики которых определяются не только заданными размерами и конструкцией, но и отклонениями от этих значений, появляющимися в процессе эксплуатации или полученными вследствие технологии их изготовления.

Значительное влияние на уровень несущей способности цилиндрических оболочек оказывает неравномерность деформирования, вызванная овальностью торцов оболочки. Несовершенство торцовых крупногабаритных оболочек возникает, как правило, вследствие их деформации под действием собственного веса при их механической обработке, хранении, а также при монтаже и сборке оболочек из отдельных элементов. Другой формой несовершенств, возникающей из-за неточности сборки, является слабая конусность,

характеризующаяся углом наклона образующей оболочки к ее оси α . Таким образом, реальная цилиндрическая оболочка имеет овально-коническую форму, т. е. является оболочкой нулевой гауссовой кривизны. Все предпринятые ранее экспериментальные исследования базировались на выделении какой-либо одной характеристики неоднородности. Описать же в полной мере все основные особенности поведения неоднородно нагруженных оболочек нулевой гауссовой кривизны можно только на основе моделирования зависимости несущей способности от несовершенств на основе МСЭА.

2. Нерешенные проблемы и цели работы

Традиционные подходы к оценке влияния начальных геометрических несовершенств формы тонкостенных оболочек на их деформирование и устойчивость базируются на рассмотрении упрощенных теоретических моделей, полученных из общих уравнений механики сплошной среды путем введения ряда допущений. Эти модели, как правило, описывают влияние одного из выбранных факторов при неконтролируемых остальных, конструкция оболочки представляется упрощенно, результаты не дают непосредственной оценки параметров несущей способности. Кроме того, получаемые в результате расчетов данные получаются не в виде формулы, а представляют собой массивную выборку оценок исследуемых параметров и требуют статистической обработки для дальнейшего анализа и практического применения. Аппроксиманты, полученные на основе обработки выборки, зачастую имеют близкие, статистически неразличимые характеристики и выбор из них наилучшего приближения превращается в неформальную задачу, решение которой каждый исследователь производит по-своему. Наличие большого числа факторов, описывающих процесс потери устойчивости тонкостенных оболочек, их сложное взаимодействие и чувствительность анализируемых конечных характеристик к малому изменению факторов требует создания новой концепции построения и исследования модели по сравнению с традиционными методами анализа. Такой концепцией может быть многофакторный структурно-экстраполяционный анализ (МСЭА) [1, 2]. В настоящей статье рассмотрено его применение к исследованию задач устойчивости неидеальных цилиндрических оболочек с целью адекватного моделирования их деформирования и устойчивости.

3. Используемый метод моделирования МСЭА

В соответствии с МСЭА величина несущей способности рассматривается как многомерная функция отклика, эффективно характеризующая работоспособность конструкции, допускающая однозначную количественную оценку, непосредственно измеримая в процессе эксперимента, являющаяся непрерывной случайной функцией с нормальным законом распределения. Указанным требованиям в полной мере соответствует коэффициент критических безразмерных напряжений K .

Параметры неоднородности представляются в виде системы независимых, совместимых и измеримых на экспериментальных образцах факторов, допускающих количественную оценку, возможность установки их на заранее заданном уровне с достаточно высокой точностью посредством конкретных

технологических операций. Для заданной формы оболочек таким требованиям удовлетворяют конусность оболочки α , овальность (a/b) , а также овальность верхнего $(a/b)_B$ и нижнего $(a/b)_H$ торцов.

Связь между параметрами полученной таким образом системы может быть найдена на основе оценки экспериментальных данных методом максимума правдоподобия и получения коэффициентов модели в полиномиальной форме.

Для определения коэффициентов и статистических свойств модели требуется проведение многофакторного эксперимента. Схема реализации эксперимента выбирается с учетом методики обработки и преследует цель получения оптимальных свойств модели при минимальном числе испытаний. При наличии только активных (управляемых) переменных предпочтительнее полный факторный эксперимент на основе центрального ортогонального композиционного плана [1]. Каждая из переменных стандартизуется в выбранном диапазоне изменения [2]; полученные таким образом стандартизованные величины изменяются в диапазоне, близком к (-1, 1), что снижает погрешность при машинной обработке результатов эксперимента и позволяет алгоритмизировать процесс получения плана эксперимента.

Если результаты измерений функции отклика в различных точках факторного пространства являются независимыми нормально распределенными случайными величинами, выборочные дисперсии в этих точках однородны, а независимые переменные измеряются с ошибкой, существенно меньшей, чем ошибка измерения функции отклика, то метод максимального правдоподобия преобразуется к регрессионному анализу. Это позволяет применить хорошо разработанные методы статистической обработки данных [1]. Применение метода максимального правдоподобия для оценивания коэффициентов регрессии в случае нормального распределения сводится к методу наименьших квадратов, а выбор наилучшей модели можно осуществить путем реализации пошаговой процедуры отбрасывания незначимых членов.

Известно, что работоспособность одной и той же конструкции, системы и технологического процесса можно представить различными математическими моделями, отличающимися числом переменных и порядком уравнения. Если при реализации пошаговой процедуры выявлены модели, одинаково хорошо удовлетворяющие всем статистическим критериям, то для определения наилучшей из них необходимо использовать физически обоснованные критерии, предложенные в [1]. Эти критерии характеризуют работоспособность модели в особых точках факторного пространства, находящихся вне области эксперимента. Они отражают выполнение некоторых обязательных с механической точки зрения соотношений в особых точках факторного пространства, в которых предсказанное моделью значение параметра несущей способности сравнивается с теоретически очевидным результатом. Адекватное поведение модели в таких точках позволяет говорить о ней, как о некоей физически обоснованной зависимости, применимой к задаче в целом, а не как о локальной аппроксиманте эмпирических данных.

Построение и исследование выбранной математической модели определяется характером изучаемого объекта. Для эффективного исследования таких многофакторных систем как реальные натурные конструкции или объекты

используется принцип "раскачивания" условий нормальной эксплуатации или установившегося технологического процесса с целью наблюдения неординарных функциональных связей и достижения адекватных оценок.

Выбранная на основе совокупности статистических и физических критериев математическая модель может быть использована для практических расчетов и анализа нелинейного взаимодействия и влияния факторов на несущую способность как в области эксперимента, так и при некоторой экстраполяции.

4. Анализ результатов многофакторных экспериментов

Были реализованы двухфакторные эксперименты второго порядка на двух уровнях α и (a/b) , а также на двух уровнях овальности нижнего $(a/b)_H$ и верхнего $(a/b)_B$ торцов при $\alpha^\circ = 1$ (при малой конусности различие между нижним и верхним торцом отсутствует).

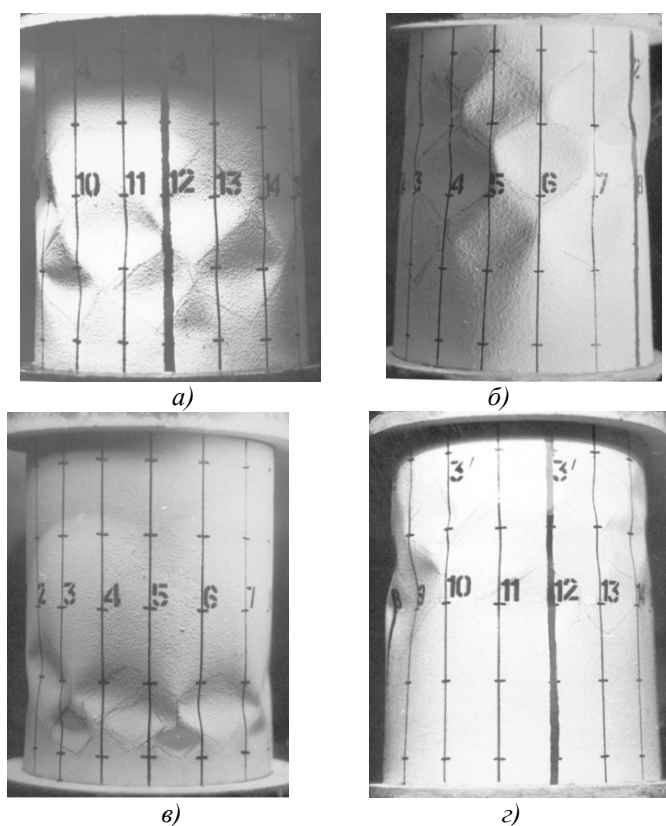


Рис.1. Формы потери устойчивости оболочки с малой конусностью и одинаковой малой овальностью торцов (а), с большой конусностью и одинаковой большой овальностью торцов (б), с большой конусностью и большей овальностью нижнего торца (в), с большой конусностью и большей овальностью верхнего торца (г)

Испытывались сварные образцы радиусом $R = 71,5$ мм и длиной $L = 200$ мм, изготовленные из листовой стали марки X18H9–н толщиной $\delta = 0,25$ мм.

Испытания опытных образцов на устойчивость, проведенные на машине УМЭ-10ТМ, показали, что исчерпание несущей способности оболочки происходит в один этап, путем достижения предельной точки (см. Рис. 1).

По результатам эксперимента построены математические модели вида:

$$\text{при } (a/b)_H^\circ = (a/b)_B^\circ = (a/b)^\circ$$

$$K = 0,379 + 0,0029\alpha^\circ - 0,012(a/b)^\circ - 0,014\alpha^\circ (a/b)^\circ;$$

при $\alpha^\circ = 1$

$$K = 0,346 - 0,017(a/b)_H^\circ - 0,0033(a/b)_B^\circ - 0,013(a/b)_H^\circ (a/b)_B^\circ,$$

где $(...)^{\circ}$ — стандартизированная величина; $K = \frac{T_{кр}}{2\pi E\delta^2}$ — коэффициент критических безразмерных напряжений; $T_{кр}$ — критическое значение сжимающей нагрузки; E — модуль Юнга.

Полученные модели адекватны экспериментальным данным по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости. Присутствие в ней значимых членов второго порядка указывает на существенную нелинейность взаимосвязи параметров α и (a/b) , а также $(a/b)_H$ и $(a/b)_B$, и, следовательно, на некорректность раздельного рассмотрения параметров и постановки однофакторных экспериментов. Соответствующие им поверхности парных взаимодействий приведены на Рис 2.

Анализ поверхности на Рис. 2а показывает, что увеличение одиночных несовершенств значимо снижает несущую способность оболочки. Кроме того, в рассматриваемых пределах овальность имеет большее влияние на параметр K , чем конусность. Это соответствует данным однофакторных экспериментов. Но из анализа Рис. 2а также следует, что одновременное увеличение конусности и овальности может привести к повышению несущей способности до уровня, соответствующего бездефектной оболочке. Это является существенно нелинейным эффектом, который не мог быть найден в результате однофакторных экспериментов.

Дальнейшее изучение нелинейного взаимодействия несовершенств (см. Рис. 2б) показало, что при развитой конусности овальность нижнего торца оказывает более значимое влияние на параметр критических усилий, чем овальность верхнего торца. Совместное увеличение овальности торцов приводит к повышению несущей способности, что также является существенно нелинейным эффектом.

5. Выводы по результатам исследований

Приведена комплексная методика, позволяющая получить обоснованную оценку несущей способности тонкостенных оболочек с несовершенствами с учетом многофакторного теоретико-экспериментального подхода при неоднородном нелинейном деформировании.

Изучены формы потери устойчивости конических оболочек с овальными торцами. Получены модели зависимости критических усилий от совместного влияния параметров несовершенств, произведен их анализ.

Зависимость несущей способности от конусности и овальности носит немонотонного характер и отдельное рассмотрение влияния параметров на уровень критических нагрузок некорректно.

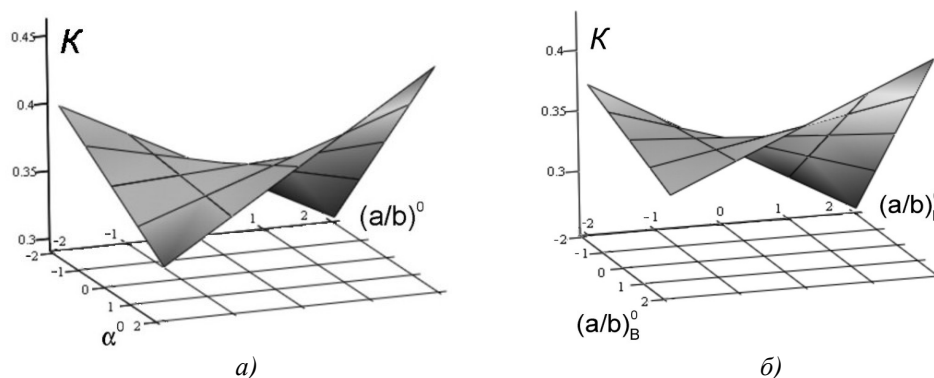


Рис. 2. Поверхности парных взаимодействий несовершенств для α и (a/b) при

$$(a/b)_H^0 = (a/b)_B^0 = (a/b)^0 \quad (a) \text{ и для } (a/b)_H \text{ и } (a/b)_B \text{ при } \alpha^0 = 1 \quad (б)$$

Показана возможность повышения несущей способности за счет увеличения овальности при варьировании конусности в некотором определенном диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилов П.И., Мильцин А.М., Олевский В.И. Многофакторный структурно-экстраполяционный анализ в задачах управления эффективностью обогащательных процессов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77)-37(78). – С. 204 – 217.
2. Пилов П.И., Мильцин А.М., Олевский В.И. Нелинейный анализ эффективности обогащения и прочности тонкостенных элементов машин на основе стандартизованных многофакторных моделей // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 39(80). – С. 202 – 214.