

УДК 639.3

Представлена методика і результати комплексного експериментального вивчення докритичних переміщень і процесу втрати стійкості неоднорідно навантажених циліндричних, конічних, овальних і овально-конічних оболонкових конструкцій методами голографічної інтерферометрії і багатofакторного структурно-екстраполяційного аналізу (МСЕА)

Ключові слова: оболонки, гаусова кривизна, багатofакторний експеримент, голографічна інтерферометрія

Представлена методика и результаты комплексного экспериментального изучения докритических перемещений и процесса потери устойчивости неоднородно нагруженных цилиндрических, конических, овальных и овально-конических оболочечных конструкций методами голографической интерферометрии и многофакторного структурно-экстраполяционного анализа (МСЭА)

Ключевые слова: оболочки, гауссова кривизна, многофакторный эксперимент, голографическая интерферометрия

Here is outlined the technique and results of a comprehensive experimental study of sub-critical displacements and of the process of stability loss of inhomogeneously loaded constructions of cylindrical, conical, oval and oval-conic shells by methods of holographic interferometry and multivariate structural and extrapolational analysis (MSEA)

Keywords: shells, the Gaussian curvature, multivariate experiment, holographic interferometry

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК НУЛЕВОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ

А.М. Мильцын

Кандидат технических наук, профессор, начальник
отдела*

Контактный тел.: (056) 780-22-08

E-mail: miltsin@bk.ru

В.И. Олевский

Кандидат технических наук, заместитель директора*

Контактный тел.: (056) 780-22-07

E-mail: volevnew@gmail.com

Ю.Б. Олевская

Математик, научный сотрудник*

Контактный тел.: (056) 780-22-08

E-mail: ojulianew@gmail.com

В.В. Плетин

Инженер-математик, научный сотрудник*

*ТД Днепропетровского завода сварочных материалов
ул. Мониторная, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49130

Контактный тел.: (056) 780-22-08

1. Введение

Тонкостенные оболочки широко применяются во многих областях техники и строительства благодаря своей способности выдерживать разнообразие видов нагрузок, обеспечивая минимальный вес конструкции и изоляцию от окружающей среды. Потеря устойчивости является основной причиной разрушения оболочечных конструкций, изготовленных из металла и современных конструкционных материалов. Несовершенство методик, используемых для расчета таких объектов, наглядно продемонстрировали произошедшие в последние несколько лет обрушения различных сооружений и производственные аварии.

Наиболее широким классом оболочек, используемых в машиностроении и строительстве, является

класс оболочек нулевой гауссовой кривизны. К этому классу относятся практически все оболочки, изготавливаемые из листовых материалов путем соединения обечаек. Для анализа деформирования и устойчивости таких оболочек особенно важно изучение реальных свойств несущей способности ввиду их особой чувствительности к влиянию различных возмущающих факторов. Значительное влияние на уровень их несущей способности оказывает неравномерность осевых сжимающих усилий, вызванная конусностью оболочки и овальностью ее торцов. Напряженно-деформированное состояние оболочечных конструкций в этом случае является неоднородным и существенно моментным. Постоянный интерес исследователей к задаче неоднородного сжатия оболочек нулевой гауссовой кривизны не привел к настоящему времени к ее

корректному решению, ни в области теоретических, ни в области экспериментальных исследований. Поэтому сегодня возникает необходимость применения новых схем экспериментальных исследований, позволяющих рассмотреть задачу в усложненной постановке, наиболее адекватной реальному поведению конструкций.

2. Методика автоматизированного голографического эксперимента

При решении современных задач разработки и совершенствования тонкостенных элементов машин, работающих в условиях интенсивного технологического процесса, перспективным является использование метода голографической интерферометрии [1-5]. Он позволяет провести наиболее точное и полное исследование оболочечных конструкций при сложном напряженно-деформированном состоянии. Точность расшифровки голографических интерферограмм в основном определяется количеством опорных точек поверхности конструкции, используемых для построения полей перемещений и напряжений. Повышение точности требует большого объема рутинной подготовительной работы по вводу координат точек и соответствующих им порядков полос при отработке данных на компьютере, что особенно существенно при проведении эксперимента. Существующие методы автоматизированного ввода и обработки интерферограмм [3] рассчитаны, как правило, на конкретные конфигурации оптической схемы и типы деформированного состояния (плоского, одномерного и т.д.), что затрудняет их использование в рассматриваемом случае. Кроме того, предлагаемые рядом авторов методики расшифровки [1, 3, 4] не учитывают в полной мере статистического характера вводимых данных. Для цилиндрических оболочек была предложена методика автоматизированной обработки результатов голографического исследования, которая устраняет указанные недостатки [5]. Предлагается развитие этой методики для изучения перемещений оболочечных конструкций нулевой гауссовой кривизны, базирующееся на современных средствах интерактивной обработки данных.

Поверхность нулевой гауссовой кривизны можно с достаточной точностью аппроксимировать системой плоских прямоугольных панелей, боковыми сторонами которых являются отрезки близких по положению образующих. Для определения всех компонент вектора перемещений точек конструкции используется трехголограммная схема интерферометра, основанная на одном опорном пучке. Схема интерферометра показана на рис. 1.

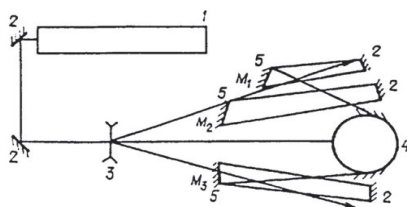


Рис. 1. Схема интерферометра. 1 - лазерный генератор, 2 - зеркала, 3 - расширяющая линза, 4 - изучаемый объект, 5 - фотопластины

После регистрации двух экспозиций - при ненагруженном и нагруженном состоянии объекта - получают плоские изображения интерференционной картины, соответствующие наблюдению из точек $M_i(x_{ni}, y_{ni}, z_{ni})$, $i=1,3$. Ввод линий порядка с помощью компьютера осуществляется следующим образом. Полученные фотограммы интерферограмм сканируются и заносятся в память компьютера в виде графических файлов с расширением, например, jpg, являющимся самым популярным вариантом сжатия графической информации на всех платформах, или в виде файлов другого формата. Далее файл воспроизводится на экране в специально созданном окне на панели обработки изображения. Снятие информации производится путем последовательного нажатия клавиши мыши на соответствующих точках изображения по запросу специально созданной СУБД. Алгоритм дальнейшей обработки полученных данных в основном изложен в [5]. В системе координат $X'O'Y'$ (рис. 2).

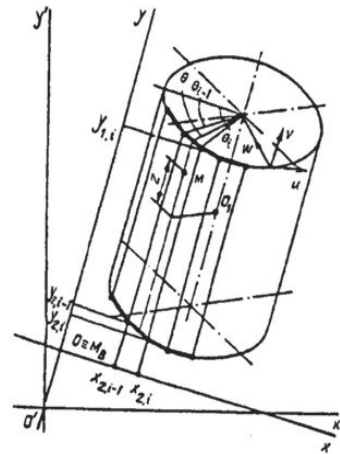


Рис. 2. Схема приближения поверхности системой складок

связанной с панелью обработки изображений, задается базовая точка $M_B(x'_B, y'_B)$ и отрезок оси OY системы координат XOY , направление которой совпадает с направлением проекции вертикальной оси. Дальнейшие вычисления производятся в системе XOY , для чего введенные координаты точек линий равного порядка преобразуются по формулам

$$x = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi - x_B, y = y' \cos \varphi - x' \sin \varphi - y_B,$$

где φ - угол поворота системы XO относительно $X'O'Y'$,

$$x_B = x'_B \cos \varphi + y'_B \sin \varphi, y_B = -x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi$$

При вычислении физических координат используется упоминавшаяся аппроксимация поверхности оболочки системой складок (рис.2). В этом случае физические координаты точки $M(r, z, \theta)$, расположенной в i -той складке ($i=1, n$), определяются по формулам

$$\theta = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}(x - x_{i-1}) + \theta_{i-1},$$

$$z = z_1 + \frac{y - \left[y_{2,i-1} + (y_{2,i} - y_{2,i-1})(x - x_{2,i-1}) / (x_{2,i} - x_{2,i-1}) \right]}{y_{1i} - y_{2i}}(z_2 - z_1),$$

где r, θ, z - координаты точки в цилиндрической системе координат, связанной с осью оболочки, форма поверхности аналитически задается уравнением $r = r(\theta, z)$,

r_i, θ_j, z_k - физические координаты угловых точек рассматриваемой складки,

$(x_{1,i}; y_{1,i}), (x_{2,i}; y_{2,i})$ - координаты угловых точек проекции складки в системе XOY (рис. 2).

Полученные таким образом массивы координат точек линий равного порядка, соответствующие трем некомпланарным направлениям наблюдения, позволяют аппроксимировать поверхности порядков полос. Наиболее приемлемым для этого представляется метод структурно-экстраполяционного анализа (МСЭА) [6] с пошаговым выбором наилучшей модели. Действительно, формализация ввода исходных данных при неоднородном напряженно-деформированном состоянии требует ввода большого числа точек.

Вышеописанная методика позволяет определять координаты точек центров полос с точностью до 0,1 мм [3] без каких-либо дополнительных приспособлений, что дает возможность существенно увеличить число вводимых точек (до 200-400 на каждое направление наблюдения). При этом использование сплайн-функций для сглаживания [3] требует перебора координат всех опорных точек при каждом вычислении значения порядка полосы. Это замедляет расчет и требует значительного объема памяти. Кроме того, указанные недостатки усугубляются с увеличением числа опорных точек. Использование же МСЭА позволяет на каждом шаге получить эффективные несмещенные оценки коэффициентов модели, обеспечивающие максимально правдоподобные значения порядка в опорных точках [6]. Это снимает вопрос о выборе параметра сглаживания; при этом число необходимых для расчета коэффициентов примерно на порядок меньше, чем число координат опорных точек. Кроме того, пошаговый метод позволяет формализовать процесс выбора оптимального порядка аппроксимирующего полинома на основе оценки значимости коэффициентов модели и адекватности ее исходным данным. Отметим, что в данном случае число точек значительно больше числа определяемых параметров, что позволяет говорить о значительной мощности используемых статистических критериев (Стьюдента, Фишера, Дурбина-Ватсона) и обоснованности принимаемых гипотез при выборе наилучшей модели. С увеличением числа точек характеристики регрессионной модели улучшаются; возникающая при этом возможность потери точности при суммировании может быть успешно преодолена на основе стандартизации исходных данных по известным методикам [7, 8].

Поскольку форма поверхности аналитически задается уравнением $r = r(\theta, z)$, то можно получить двумерные регрессионные модели порядков полос для i -того направления наблюдения в виде

$$N_i = \sum_{j=0}^{n(i)} \sum_{k=0}^{n(j)} b_{jki} \theta^j z^k.$$

Определение перемещений производится из системы уравнений [4]

$$MU = \lambda N,$$

где M - оптическая матрица,

$U = \{u, v, w\}$ - вектор перемещений,

λ - длина волны лазера,

$N = \{N_i\}_{i=1}^3$ - вектор порядков полос.

Дальнейшее преобразование перемещений в соответствии с соотношениями Коши и уравнениями состояния среды позволяет получить также напряженное состояние в точке. Производя вычисление параметров напряженно-деформированного состояния для образующих и направляющих оболочки с определенным шагом, можно получить данные для построения графиков распределения перемещений и напряжений.

3. Методика многофакторного эксперимента

Исследование реальных свойств несущей способности оболочек нулевой гауссовой кривизны требует учета важнейших параметров неоднородного нагружения и статистического характера взаимосвязи их с величиной критических нагрузок. 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 многофакторного метода структурно-экстраполяционного анализа [6].

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 $(a/b)_в$ и нижнего $(a/b)_н$ 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 [6]. Каждая из переменных стандартизуется в выбранный диапазоне изменения [8]; полученные таким образом стандартизованные величины изменяются в

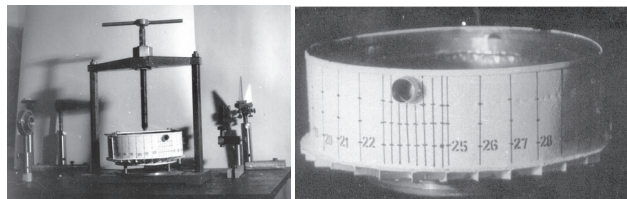
диапазоне, близком к (-1, 1), что снижает погрешность при машинной обработке результатов эксперимента и позволяет алгоритмизировать процесс получения плана эксперимента.

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 [6]. 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. Если при реализации процедуры выявлены модели, удовлетворяющие всем статистическим критериям, то для определения наилучшей из них необходимо использовать физически обоснованные критерии, предложенные в [9]. 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.

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. Изучение перемещений чана дешламатора

Предложенный алгоритм был использован для изучения перемещений чана дешламатора МД-9А. Была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая представляла собой нагружающее устройство винтового типа и силоизмеритель (рис. 3а).



а) б)

Рис. 3. Экспериментальная установка (а) и модель чана (б)

Она позволяла воссоздать усилия, действующие на несущие конструкции дешламатора вследствие тяжести механизма вращения грабель и технологического моста. Соответствующая ей модель имитировала в выбранном масштабе 1: 40 жесткостные характеристики чана, днища, силового набора и условия опирания реальной конструкции. Модель (рис. 3б) представляла собой металлическую конструкцию, состоящую из

цилиндрической обечайки с двумя группами внешних стрингеров уголкового сечения, расположенных в местах крепления моста, плоскоконического днища с продольными ребрами жесткости и одним кольцевым ребром. В цилиндрической части чана вырезаны два диаметрально расположенных отверстия, усиленных металлическими патрубками, имитирующими слив. С внутренней его стороны был приварен сливной желоб, имеющий сечение в виде тонкостенного швеллера. Вся конструкция была изготовлена при помощи точечной сварки и герметизирована изнутри для создания внутреннего гидростатического давления.

В эксперименте варьировалось соотношение осевой T и гидростатической q нагрузок. Максимальная величина гидростатического давления q определялась уровнем воды в чане H , измеренным от плоскости сочленения цилиндрической и конической частей. Для фиксации изображения использовались фотопластинки марки ВР-Л. Эксперимент проводился в отраженных лучах. Условия нагружения приведены в таблице, а пример автоматизированного ввода – на рис. 4.

Таблица

№ п/п	H, мм	T, кг
1	0	0,87
2, 3	0	0,58
4	0	0
5	30	0
6, 7, 8	60	0
9, 10, 11	60	0,58
12, 13, 14	60	0,29

Анализ полученных полей радиальных перемещений (рис. 5-8) позволяет сделать следующие выводы.

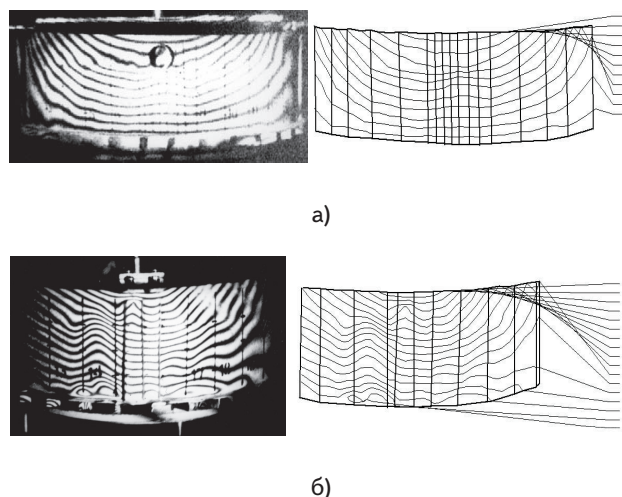


Рис. 4. Результаты автоматизированного ввода интерферограмм со стороны патрубка (а) и зоны опоры моста (б)

Во всех исследуемых случаях поле прогибов обочечайки чана неосесимметрично и неоднородно как в

осевом (L), так и в окружном (A, B, C) направлениях. Хорошо видно упругое взаимодействие цилиндрической оболочки с радиальным силовым набором нижней части чана, со стрингерами в зоне опирания моста, с отверстиями для слива и со сливным желобом.

Для случая чистого осевого сжатия (рис. 5) поле радиальных перемещений чана w можно разделить на пять подобластей: две области прогиба к центру, локализованные у патрубков, две области прогиба от центра, расположенные в зоне опоры моста и зона влияния упругой заделки у нижней границы чана.

Анализ прогибов показывает, что патрубок, сливной желоб и стрингера оказывают значительное подкрепляющее воздействие, причем перемещения в зоне стрингеров мало отличаются от основного поля (рис. 5,б), хотя в этой зоне локализована нагрузка.

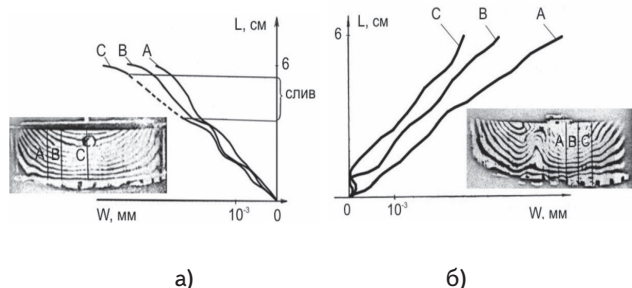


Рис. 5. Прогибы при осевом сжатии в зоне патрубка (а) и опоры моста (б)

При действии гидростатического внутреннего давления (рис. 6) оболочка чана вплоть до уровня жидкости деформируется как ансамбль панелей, размеры которых определяются силовым набором нижней части.

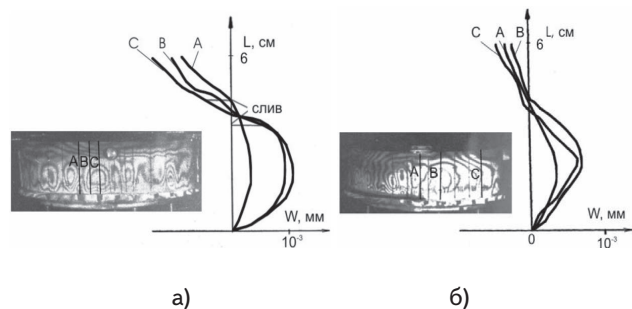


Рис. 6. Прогибы при гидростатическом внутреннем давлении в зоне патрубка (а) и опоры моста (б)

В верхней части радиальные перемещения значительно усредняются жесткостью сливного желоба, становятся практически равномерными в окружном направлении и меняют знак. Желоб остается практически неподвижным. В зоне стрингеров перемещения усредняются в осевом направлении (рис. 6,б). Такой же характер перемещения наблюдается и при неполном заполнении чана жидкостью (рис. 7).

При одновременном нагружении осевой нагрузкой и гидростатическим давлением наблюдается сложное взаимодействие ранее описанных полей прогибов с преобладанием осевой формы при большой осевой нагрузке (рис. 7,б), и панельной (рис. 8) – при малых осевых и значительных гидростатических нагрузках.

Анализ полей перемещений показывает, что расчет прочности чана дещламатора должен производиться по уточненным моделям, учитывающим неоднород-

ность поля перемещений и локальные эффекты подкрепляющего набора.

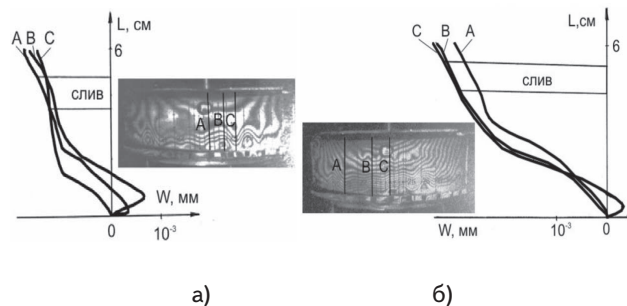


Рис. 7. Прогибы при большой осевой и малых гидростатических нагрузках в зоне патрубка (а) и опоры моста (б)

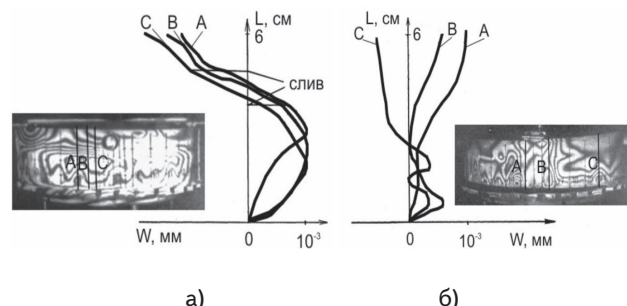


Рис. 8. Прогибы при малых осевых и значительных гидростатических нагрузках в зоне патрубка (а) и опоры моста (б)

Такой расчет позволит оптимизировать расположение силового набора и уточнить требуемую толщину стенки чана, что позволит создать менее материалоемкую и одновременно более надежную и долговечную конструкцию.

5. Изучение деформирования и устойчивости овально-конических оболочек

На уровень несущей способности цилиндрических оболочек значительное влияние оказывает неравномерность деформирования, вызванная овальностью торцов оболочки [10]. 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. В случае сварных оболочек форма торца имеет вид овала с полуосями a и b и коэффициентом сжатия (или собственно овальностью) a/b . При этом овальность верхнего торца $(a/b)_в$ может быть отлична от овальности нижнего $(a/b)_н$ из-за условий собираемости с другими элементами конструкции. Во всех случаях форма каждого торца находится в пределах допусков по собираемости и овальность ее не снижается более чем до 0,8.

Другой формой несовершенств, возникающей из-за неточности сборки, является слабая конусность, характеризующаяся углом наклона образующей оболочки к ее оси α . В ряде работ [11] считается, что малая конусность при $\alpha \leq 13^\circ$ не оказывает существенного влияния на величину критических нагрузок осевого сжатия. Однако результаты исследований устойчи-

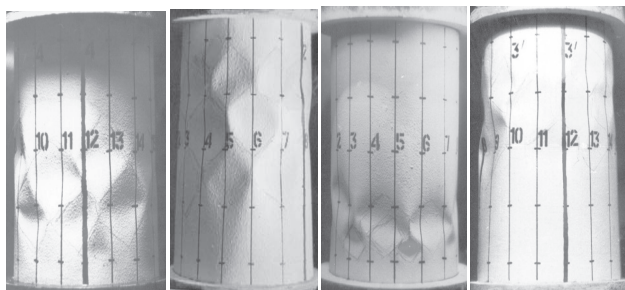
ности технологически несовершенных цилиндрических оболочек на основе многофакторного подхода [12-16] свидетельствуют о том, что увеличение α до 3° часто приводит к значимому изменению несущей способности, а в ряде случаев, при взаимодействии с овальностью и другими факторами, – к повышению критических нагрузок. Эти исследования показали необходимость более корректного подхода при установлении соответствия между величиной указанных отклонений и уровнем несущей способности. Вследствие этого возникает необходимость исследования характера деформирования оболочек при различных соотношениях параметров овальности и конусности.

Для решения поставленной задачи были реализованы двухфакторные эксперименты второго порядка на двух уровнях α и a/b , а также на двух уровнях a/b нижнего и верхнего торцов при $\alpha^\circ = 1$ (при малой конусности различие между нижним и верхним торцом отсутствует). 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. Применение многофакторного подхода позволяет корректно решить задачу о нелинейном совместном влиянии несовершенств на несущую способность оболочки.

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

Потеря устойчивости конической оболочки с одинаковой малой овальностью торцов (рис. 9а) происходит по общей форме, близкой к собственной форме потери устойчивости овальной цилиндрической оболочки при действии равномерного осевого сжатия [17], но смещенной к большему торцу. На одной стороне оболочки появляются два – три пояса вмятин, расположенных у большего торца. Они охватывают панель меньшей кривизны и распространяются на боковую часть панелей большей кривизны. Локальные вмятины имеют относительно большие размеры и образуют регулярную не замкнутую форму выпучивания.

Увеличение конусности и одинаковой овальности торцов приводит к смещению зоны волнообразования в продольном направлении к меньшему торцу (рис. 9б) при сохранении общего характера выпучивания.



а) б) в) г)

Рис. 9. Формы закритического волнообразования 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)

При высокой конусности (в пределах данного эксперимента) увеличение овальности нижнего торца при сохранении формы верхнего увеличивает продольную локализацию выпучивания (рис. 9в), смещая вмятины еще ближе к нижнему торцу при сохранении изменчивости в окружном направлении. Наоборот, превалирование при высокой конусности овальности верхнего торца приводит к существенному смещению вмятин к торцу с большей овальностью (рис. 9г).

По результатам эксперимента построены математические модели вида

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

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

$$\text{при } \alpha^\circ = 1 :$$

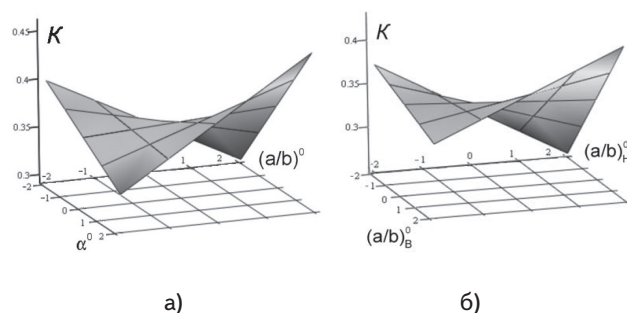
$$K = 0,346 - 0,017(a/b)_H^\circ - 0,0033(a/b)_B^\circ - 0,013(a/b)_H^\circ(a/b)_B^\circ ,$$

где (...)° – 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 $(a/b)_B$ и $(a/b)_H$, и, следовательно, на некорректность раздельного рассмотрения параметров и постановки однофакторных экспериментов.

Исследуем полученные математические модели. Соответствующие им поверхности парных взаимодействий приведены на рис. 10.



а) б)
Рис. 10. Поверхности парных взаимодействий несовершенств для α и (a/b) при $(a/b) = (a/b)_H^\circ = (a/b)_B^\circ$ (а) и для $(a/b)_B$ и $(a/b)_H$ при $\alpha^\circ = 1$ (б)

Анализ поверхности на рис. 10а показывает, что увеличение одиночных несовершенств значительно снижает несущую способность оболочки. Кроме того, в рассматриваемых пределах овальность имеет большее влияние на параметр K , чем конусность. Это соответствует данным однофакторных экспериментов [10, 11]. Но из анализа рис. 10а также следует, что одновременное увеличение конусности и овальности может привести к повышению несущей способности до уровня, соответствующего бездефектной оболочке. Это является существенно нелинейным эффектом, ко-

торый не мог быть найден в результате однофакторных экспериментов.

Дальнейшее изучение нелинейного взаимодействия несовершенств (рис. 10б) 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 и хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 10а.

Докритическое деформирование изучалось на тонкостенных оболочках с овальностью по нижнему и верхнему торцу, равной 0,84 и 0,96 и конусностью равной $0^{\circ}56'$ и $2^{\circ}16'$. Выбранные значения α , (a/b) , $(a/b)_B$ и $(a/b)_H$ соответствуют характерным точкам моделей [10-17].

Качественный анализ полей перемещений по результатам голографического эксперимента позволяет считать, что деформированное состояние оболочек при овальности неоднородно как в окружном, так и в продольном направлениях (рис. 11).

С увеличением α до $2^{\circ}16'$ неоднородность радиальных прогибов w смещается к нижнему торцу. Сравнение интерферограмм, полученных на различных уровнях нагрузки, показывает, что с ростом последней число интерференционных полос уменьшается при равных значениях дополнительной нагрузки; это свидетельствует об упрочнении конструкции, вызванном, возможно, высокой деформативностью оболочки в начале нагружения.

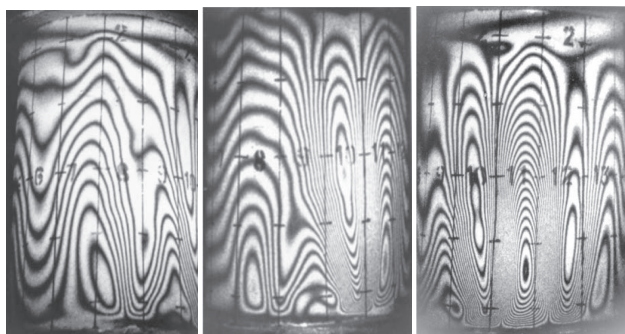


Рис. 11. Интерферограммы оболочки с конусностью и овальностью со стороны панели малой кривизны (а), зоны стыка панелей (б) и панели большой кривизны (в)

Деформирование оболочки в эксперименте соответствует характеру несовершенства торцов и существенно различается на панелях различной кривизны.

С изменением $(a/b)_H$ от 0,96 до 0,84 значительно (в 1,2–1,4 раза) возрастает податливость оболочек при сохранении общей картины распределения перемещений в окружном направлении и повышении неоднородности в продольном.

Расшифровку полей перемещений оболочек осуществляли полуавтоматически на основании приведенного алгоритма. Формы радиальных прогибов некоторых образующих представлены на рис. 12.

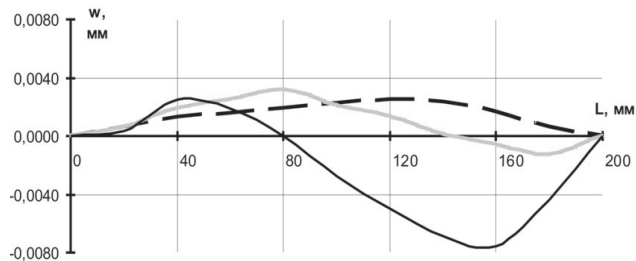


Рис. 12. Деформирование оболочки с овальностью и конусностью. Сплошные линии соответствуют срединам панелей: черная - большей кривизны, серая - меньшей кривизны; пунктирная - образующей на стыке панелей. Положительное направление - к центру кривизны

6. Выводы

Приведена комплексная методика, позволяющая получить обоснованную оценку докритического поведения и несущей способности тонкостенных оболочек нулевой гауссовой кривизны с учетом многофакторного структурно-экстраполяционного подхода и учета неоднородного нелинейного деформирования.

При помощи методики автоматизированной расшифровки данных голографической интерферометрии изучены формы докритического деформирования овальной-конических оболочек и чана дещламатора при равномерном и неравномерном осевом сжатии, гидростатическом внутреннем давлении и их комбинации.

Установлены особенности процесса потери устойчивости конических оболочек с овальными торцами. Получены модели зависимости критических усилий от совместного влияния параметров неоднородности, произведен их анализ. Зависимость несущей способности от конусности и овальности носит немонотонный характер и отдельное рассмотрение влияния параметров на уровень критических нагрузок некорректно. Показана возможность повышения несущей способности за счет увеличения овальности при варьировании конусности в некотором определенном диапазоне.

Анализ экспериментальных данных показывает, что значительные начальные неоднородности в некоторых случаях не оказывают существенного влияния на величину несущей способности, в то время как их снижение до среднего значения приводит к резкому снижению механических свойств конструкции, что является существенно нелинейным эффектом.

Литература

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия // М.: Мир, 1982. - 504 с.
2. Моссаковский В.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Деформирование и устойчивость технологически несовершенных цилиндрических оболочек при неоднородном напряженном состоянии // Проблемы прочности. - 1990. - N12. - С.28-32.

3. Кудрин А.Б., Бахтин В.Г. Прикладная голография (исследование процессов деформации металлов)// М.: Металлургия, 1988. - 248 с.
4. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике// М.: Машиностроение, 1984. - 176 с.
5. Моссаковский В.И., Мильцын А.М., Селиванов Ю.М., Олевский В.И. К вопросу автоматизации обработки результатов голографического эксперимента // Проблемы прочности.– 1994. – N 5. – С.78-85.
6. Пилов П.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Многофакторный структурно-экстраполяционный анализ в задачах управления эффективностью обоганительных процессов// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77)-37(78). – С. 204 – 217.
7. Филаретов Г.Ф. К вопросу о построении нелинейной регрессионной модели по данным пассивного эксперимента/ В кн.: Проблемы планирования эксперимента// М.: Наука, 1969. - с. 5 - 10.
8. Пилов П.И., Мильцын 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.
9. Мильцын А.М. Олевский В.И. Алгоритмизация построения, статистической обработки и анализа многофакторной регрессионной модели, содержащей управляемые, неуправляемые или смешанные переменные, в интерактивном режиме // Днепрпетровск, 1988. - 157 с. Деп. в ВИНТИ 13.01.88, №188 - В88.
10. Красовский В. Л. Деформирование и выпучивание гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при статическом нагружении (экспериментально-теоретическое исследование): Дис... д-ра техн. наук: 05.23.17 / Приднепровская гос. академия строительства и архитектуры. - Д., 2000. - 367 с.
11. Преображенский И.Н. Грицак В.З. Устойчивость и колебания конических оболочек//М., 1986. 240 с.
12. Мильцын А. М. Применение многофакторного анализа при исследовании несущей способности тонкостенных цилиндрических оболочек // Оценка характеристик качества сложных систем и системный анализ: Тез. докл. 1-го Всесоюз. научно-техн. семинара. - М.,1978. – С. 268.
13. Мильцын, А. М. Влияние технологических несовершенств на устойчивость тонкостенных оболочек (многофакторный подход) Ч. I // Известия АН СССР. Механика твердого тела. - 1992. - N 6. - С. 181–188.
14. Мильцын, А. М. Нелинейное взаимодействие технологических несовершенств и их влияние на устойчивость тонкостенных оболочек (многофакторный подход) Ч. II // Известия АН СССР. Механика твердого тела. - 1993. - N 1. - С. 178–184.
15. Мильцын А.М., Дзюба А.П., Олевский В.И. Обоснование и построение системы допусков на изготовление и эксплуатацию тонкостенных конструкций // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла: зб. наук. праць. - Д.: Изд-во ДГУ. - 1992. - С. 81–86.
16. Моссаковский В.И. Маневич Л.И., Мильцын А.М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек//Киев: Наукова думка,1977.-136 с.
17. Андреев Л.В., Ободан Н.И., Лебедев А.Г. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации //М.: Наука, 1988. – 208 с.