

## ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК

**Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Коломийчук Г.П., к.т.н., доцент,  
Щвец Е.П., аспирант**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Реальные тонкостенные оболочки, как правило, имеют дефекты, вызванные локальными возмущениями формы, образовавшимися в процессе изготовления, сборки, транспортировки, монтажа. Наличие дефектов является основным фактором, снижающим критическую нагрузку, а также главной причиной разброса экспериментальных данных и плохой корреляции между расчетными данными теории малых прогибов и экспериментальными результатами. Из этого следует большой практический интерес к проблеме исследования чувствительности тонкостенных оболочечных конструкций к наличию начальных несовершенств [1-5].

Начальные возмущения оболочек могут быть классифицированы следующим образом: 1) несовершенства формы – начальные погиби или вмятины, отклонения фактических размеров от заданных; 2) несовершенства напряженного состояния – наличие полей самоуравновешенных начальных напряжений, полей макросвойств материала и т.п.; 3) несовершенства воздействий – отклонение реальных условий загрузки от расчетных, пульсация нагрузки; 4) несовершенства граничных условий. Наиболее опасными, как правило, оказываются несовершенства формы [6].

Понятие о начальных несовершенствах ввел в научный обиход Доннелл Л.Г. в 1934 году; он же предложил, что начальные прогибы можно адекватно описать конечной системой детерминированных функций, либо зависимостями, параметры которых определялись при минимизации критических сил.

Обширное число теоретических и экспериментальных исследований как отечественных, так и зарубежных авторов посвящено оценке влияния начальных прогибов на устойчивость оболочек. Большинство их выполнены применительно к упругим, преимущественно металлическим оболочкам.

Исследования влияния начальных прогибов можно распределить на четыре группы: 1) произвольные начальные прогибы – обычно это ра-

боты посвящены численному решению на ЭВМ соответствующих уравнений; 2) начальные прогибы копирующие форму потери устойчивости оболочки идеальной формы, – исследования начального после критического состояния и чувствительности к начальным прогибам; 3) начальные прогибы частных видов – вмятины, плоские участки и т.д.; 4) случайные начальные прогибы.

Потребность в надежных космических аппаратах в начале 60-х годов послужила толчком в постановке тщательных экспериментов на цилиндрических (рис. 1) и сферических (рис 2) оболочках.

Кренцке М. [7] проводил серию испытаний 26 полусфер из сплавов алюминия, которые опирались на подкрепленные шпангоутами цилиндры, сконструированные с целью создания мембранных граничных условий. Оболочки были толстостенными при значениях  $R/h = 11 \div 107$ . Все образцы тщательно обрабатывались с минимальными допусками на изготовление (максимальные отклонения в толщине и от формы сферической поверхности составляли соответственно 0,75% и 0,00001 от радиуса). Цель работы состояла в моделировании поведения замкнутой сферы. Почти во всех случаях оболочки теряли устойчивость путем образования «ямки» в зонах, далеких от опоры, что указывало на достижение поставленной цели.

Несмотря на то, что все испытанные образцы работали перед потерей устойчивости в пластической стадии, автору все же удалось получить в некоторых случаях величину критического давления, приближающегося к 70% от классического критического давления идеальной оболочки.

Испытанные М. Кренцке два дополнительных образца ( $R/h = 165$ ) были изготовлены еще более тщательно – один из них потерял устойчивость при 73%, а другой при 90% от классического критического давления.

Результаты обширных исследований стальных штампованных сферических оболочек с технологическими вмятинами ( $R/h = 120 \div 136$ ) представлены в работе [8]. После проведения тщательных обмеров начальных несовершенств модели были испытаны на устойчивость внешним гидростатическим давлением. Результаты опытов показали, что потеря устойчивости происходила в том районе, где имели место наибольшие отклонения от сферической формы. На потерю несущей способности оказывали влияние также пластические деформации, возникавшие при развитии вмятин.

$$\lambda = \frac{P_3}{P_{кл}}$$

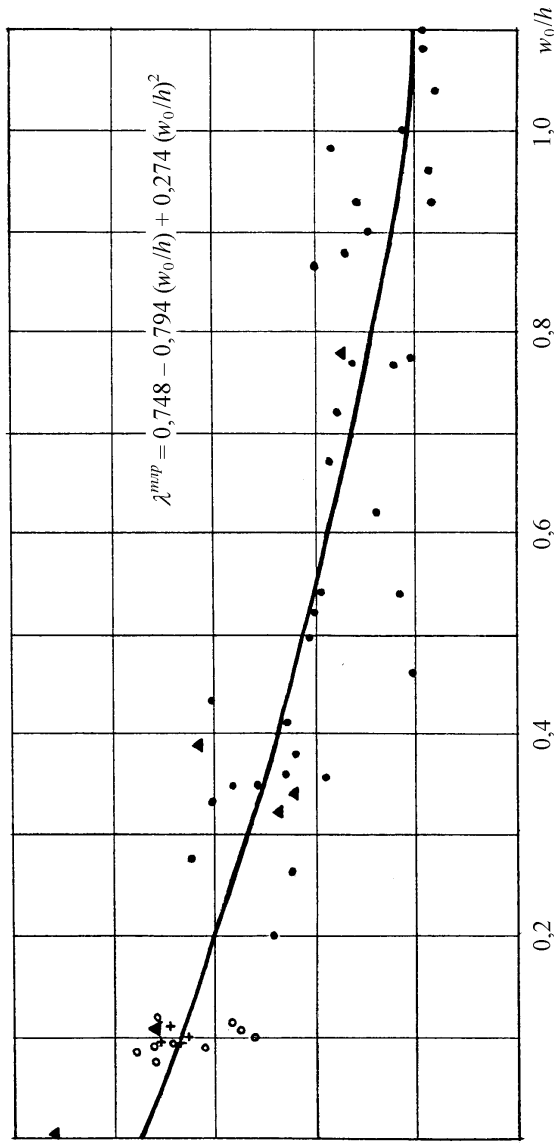


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические значения относительных критических нагрузок замкнутых оболочек при осевом сжатии [9];  $P_3$  – экспериментальная продольная критическая нагрузка;

$P_{кл}$  – классическая теоретическая критическая нагрузка;  $w_0$  – начальный прогиб /максимальный/;

$h$  – толщина оболочки;  $\lambda^{\text{теор}}$  – теоретическая линия регрессии подобрана по методу наименьших квадратов.

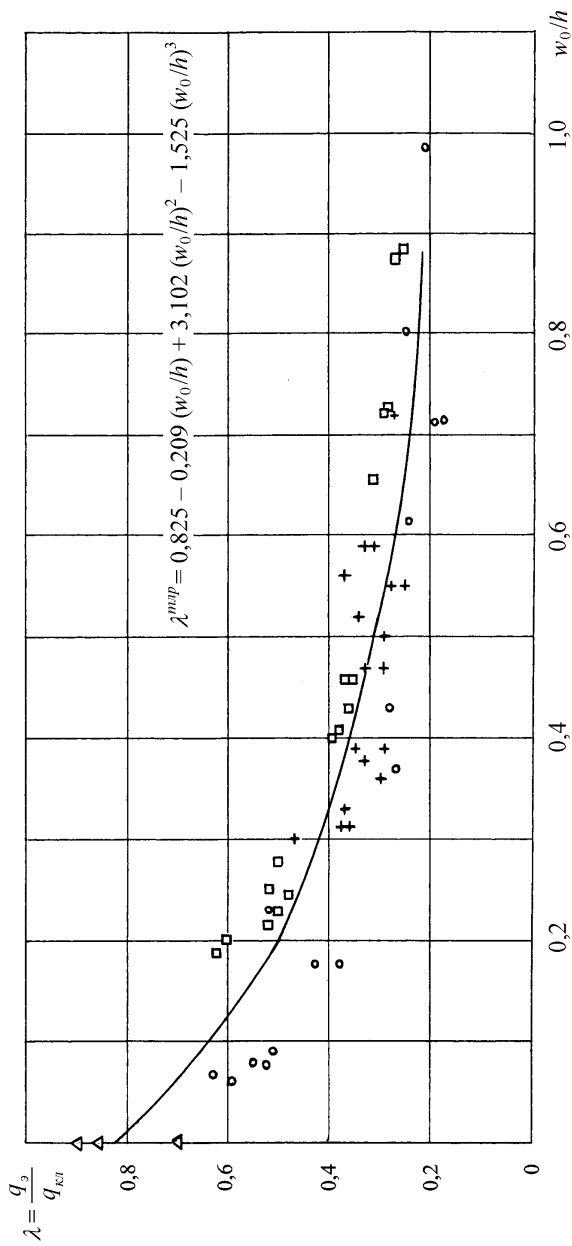


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические значения относительных критических нагрузок открытых сферических оболочек при внешнем давлении [10]:  $q_s$  – экспериментальная поперечная критическая нагрузка;  $q_{kl}$  – классическая теоретическая критическая нагрузка.

В эксперименте [11] испытывались несовершенные цилиндрические оболочки из латуни, нержавеющей стали Я1Т и магниевого сплава АМГ-6М. Начальные несовершенства в форме оболочки измерялись с помощью специально изготовленной установки. Полученные начальные погиби по различным образующим оболочки в дальнейшем обрабатывались с целью нахождения осесимметричных составляющих по ряду поперечных сечений. При этом отсчет погибей производился относительно средних окружностей торцов оболочки.

Отклонения начальных несовершенств были большими (табл. 1). Нагрузка соответствующая потере устойчивости одного из образцов, составила 38,7% от классического давления.

В эксперименте Теннисона [12] испытывались оболочки из фотоупругой пластмассы, изготовленные центробежным литьем. Образцы деформировались упруго, что позволило производить многократные испытания на одном и том же образце. Размеры образцов были такие:  $R = 10,55$  см,  $h = 0,0586$  см,  $L = 41,0$  см,  $L/R = 4$ ,  $R/h = 160$ . Разностенность не превышала 6%, испытания проводились на жесткой испытательной машине. Величина критической нагрузки соответствовала  $\lambda = 0,90$ . Форма потери устойчивости, полученная фотоупругим способом, в первоначальной стадии выпучивания близко соответствовала форме, предсказанной линейной теорией. При увеличении нагрузки эта форма переходила в характерную для больших прогибов ромбовидную форму. Основной вывод – в хорошо поставленном эксперименте может реализоваться верхняя критическая нагрузка.

Таблица 1

Экспериментальные значения относительных критических нагрузок замкнутых цилиндрических оболочек

| № | $\frac{L}{R}$ | $\frac{R}{h}$ | кол-во | $\lambda = \frac{P}{P_{кл}}$ | $\frac{f_{max}^0}{h_{ср}}$ | Материал               | Автор |
|---|---------------|---------------|--------|------------------------------|----------------------------|------------------------|-------|
| 1 | 2,65          | 100 ÷ 180     | 7      | 0,530 ÷ 0,760                | 0,065 ÷ 0,118              | фотоупругая пластмасса | [13]  |
| 2 | 2,80          | 195           | 2      | 0,689 ÷ 0,706                | 0,083 ÷ 0,084              | – " –                  | [13]  |
| 3 | 2,80          | 180 ÷ 195     | 5      | 0,628 ÷ 0,706                | 0,088 ÷ 0,112              | – " –                  | [13]  |
| 4 | 3,00          | 226 ÷ 630     | 7      | 0,345 ÷ 0,919                | 0 ÷ 0,773                  | – " –                  | [14]  |
| 5 | 4,00          | 310 ÷ 320     | 14     | 0,245 ÷ 0,387                | 0,2 ÷ 0,929                | Л-62                   | [11]  |
| 6 | 5,00          | 138 ÷ 174     | 10     | 0,100 ÷ 0,219                | 0,275 ÷ 0,543              | АМГ-6М                 | [11]  |
| 7 | 5,00          | 283 ÷ 488     | 14     | 0,131 ÷ 0,316                | 0,576 ÷ 1,450              | Я1Т                    | [11]  |

Влияние симметрично распределенных начальных несовершенств на устойчивость круговых цилиндрических оболочек выполнено в работе [13] (табл. 1). В состав рассмотренных форм несовершенств входили равномерно-распределенные синусоидальные волны, группы синусоидальных волн постоянной амплитуды и различной длины волны и, что особенно важно для практики, случайные поверхности распределения отклонения. Для каждого случая были изготовлены экспериментальные модели методом центробежного литья из фотоупругой эпоксидной смолы. Выяснилось, что для равномерной и смешанной форм распределения несовершенств существует предельная длина осесимметричной волны, при которой критическая нагрузка для заданного значения амплитуды несовершенства получалась минимальной, что согласуется с выводами обобщенной теории Койтера. Использование преобразования Фурье для оценки спектральной плотности функции распределения несовершенств позволило установить, что потерю устойчивости для рассмотренного класса случайных осесимметричных несовершенств определяет критическая компонента частоты волн.

Эксперименты с оболочками, имеющими локальные осе симметричные вмятины проводили Хатчинсон, Теннисон и Маггеридж [14] (табл. 1). Каждая форма неправильности осуществлялась с помощью металлического шаблона, имеющего требуемую амплитуду и длину волны. Вмятина описывалась формой волны в виде

$$w_0(x) = -\frac{\delta}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi x}{l_x} \right); \quad -l_x \leq x \leq l_x, \quad (1)$$

где  $l_x$  – длина полуволны вмятины в осевом направлении.

Один из образцов потерял устойчивость при 91,9% от классической критической нагрузки.

### **Выводы**

1. Обширные обмеры геометрии оболочек показали, что реальные оболочки, как правило, обладают случайными дефектами формы.
2. Расчет несимметричных оболочек следует вести с учетом возможных дефектов при изготовлении.

## SUMMARY

**Modern design, construction and operation of thin-walled shells should be performed taking into account the increased quality requirements. The influence of unfavorable initial imperfections of the middle surface, resulting in a real building structures, the stability of shells of different geometry is shown.**

### *Литература*

1. Гоцуляк Е.А., Прусов Д.Е., Аранций Н.Е. Об устойчивости геометрически несовершенных оболочек общего вида // Прикладная механика, 2000. – Том 36. - № 11. – С. 82-87.
2. Журавлев А.А., Вержбовский Г.Б., Лонг Кимсуор. Устойчивость сферической оболочки при равномерном внешнем давлении с учетом начальных неправильностей формы ее срединной поверхности // Известия вузов. Строительство, 2003. - № 7. – С. 19-26.
3. Коломійчук Г.П., Стельмашук І.П. Вплив дефектів при виготовленні на деформування циліндричних оболонок покриття // Матеріали науково-практичного форуму «Екологічні, технологічні та соціально-економічні аспекти ефективного використання матеріально-технічної бази АПК». – Львів: ЛНАУ, 2008. – С. 541-545.
4. Дорофеев В.С., Лучко Й.Й., Коломійчук Г.П. Розрахунок стійкості пологих залізобетонних оболонок з урахуванням невідгінних локальних обмежених початкових недосконалостей форми // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменярь, 2012. – Вип. 9. – С. 323-332.
5. Дорофеев В.С., Коломійчук Г.П. Влияние начальных невыгодных несовершенств формы срединной поверхности на устойчивость оболочек // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2012. – Вип. 46. – С. 102-117.
6. Тимашев С.А. Устойчивость подкрепленных оболочек, – М.: Стройиздат, 1974. – 256 с.
7. Тонкостенные оболочечные конструкции: теория, эксперимент и проектирование // Сборник трудов. – М.: Машиностроение, 1980, – 607 с.
8. Чуриков Б.В., Шишалов Ю.П. Учет влияния начальных несовершенств на устойчивость штампованных сферических обо-

- лочек // Строительная механика и расчет сооружений, 1978. – № 6. – С. 28-31.
9. Коломийчук Г.П. Влияние начальных несовершенств формы на устойчивость металлических и пластмассовых моделей замкнутых цилиндрических оболочек при осевом сжатии // Материалы V Международного симпозиума «Современные конструкции из металла и древесины», Одесса: ВМК «Місто майстрів». – 2001. – С. 130-132.
  10. Айзен Б.М. Расчет несущей способности сферических оболочек в условиях кратковременного и длительного действия нагрузки: Дис... канд. техн. наук. – Одесса, 1985. – 18 с.
  11. Коц В.М., Липовский Д.Е. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек с учетом начальных возмущений // Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – М.: Наука, 1966. – С. 509-515.
  12. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
  13. Теннисон, Маггеридж, Касуэлл. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек имеющих осесимметрично распределенные начальные несовершенства // Ракетная техника и космонавтика, 1971. – Т. 9. – № 5. – С. 195-203.
  14. Хатчинсон, Теннисон, Маггеридж. Влияние локальной осесимметричной неправильности формы на выпучивание круговой цилиндрической оболочки при осевом сжатии // Ракетная техника и космонавтика, 1971. – Т. 9. – № 1.