ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Репринцев Алексей Васильевич

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ И ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

05.23.17 - Строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1992

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Институте технической механики АН Украины.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
В. С. Гудрамович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор
В. Г. Зубчанинов
кандидат технических наук, доцент
Е. В. Бинкевич

Ведущая организация:
Запорожский индустриальный институт

Защита состоится "22" мая 1992 г. в 15 часов на заседании специализированного Совета Д 114.07.02 Днепропетровского института инженеров транспорта (320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. академика Лазаряна, 2, ДИИТ).

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке института.

Автореферат разослан "21" апреля 1992 г.

Ученый секретарь специализированного
Совета, доцент В. В. Татарчук

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

А к т у а л ь н о с т ь т е м ы. В настоящее время тонкостенные конструкции (пластины, оболочки) нашли применение в различных отраслях машиностроения, строительстве, авиационной и космической технике, судостроении. Создателей новой техники привлекают их высокая прочность и жесткость при сравнительно небольшом весе. Тонкостенные оболочки широко используются в качестве элементов летательных аппаратов, двигательных и энергетических установок, различных емкостей, трубопроводов, элементов приборов и т. д. Для увеличения эксплуатационных нагрузок, более эффективного использования материала оболочки подкрепляются ребрами жесткости. Практическое применение подкрепленных оболочек стимулировало разработку и совершенствование методов расчета их устойчивости и несущей способности, так как, в основном, эти факторы определяют работоспособность тонкостенных систем. Значительные успехи достигнуты при определении критических нагрузок подкрепленных упругих оболочек. Однако правильное суждение о работоспособности ряда конструкций невозможно при учете только упругих деформаций. Появление в элементах конструкции пластических деформаций вносит особенности в ее поведение под нагрузкой. Решение задач с учетом пластических деформаций позволяет более точно оценить запасы несущей способности.

5646а

В большинстве работ для подкрепленных оболочек критические нагрузки определяются на основе использования бифуркационной постановки. Между тем с самого начала нагружения прогибы растут, процесс деформирования моделируется некоторой кривой или поверхностью "нагрузка-прогиб", которую можно построить по результатам расчета напряженно-деформированного состояния. Поэтому при исследовании несущей способности в ряде случаев необходимо прослеживать весь процесс деформирования оболочки. Такой подход использовался при определении предельных состояний различных типов неупругих гладких оболочек, но для ребристых оболочек не нашел своего применения.

Для подтверждения результатов, полученных на основе идеализированных математических моделей, их корректировки, выявления качественных особенностей деформирования большое значение

НТБ ДИИЖТ
Днепропетровский институт инженеров ж.д. транспорта им. М. И. Калинина
БИБЛИОТЕКА

имеет проведение экспериментов. Экспериментальные исследования упругопластических оболочек сопряжены со многими трудностями, вызванными высокими уровнями нагрузок, необходимостью специального оборудования, сложностью проведения замеров деформаций. По этой причине количество работ, посвященных экспериментам с ребристыми оболочками, деформирующимися за пределом пропорциональности материала, сравнительно невелико.

Все это обуславливает актуальность теоретических и экспериментальных исследований упругопластического деформирования и предельных состояний подкрепленных оболочек.

В диссертационной работе приведены результаты исследования процесса деформирования и определения критических и предельных нагрузок цилиндрических оболочек, подкрепленных продольными и поперечными ребрами при нагружении внешним давлением и осевой сжимающей силой за пределом упругости материала. Такое нагружение характерно для реальных случаев эксплуатации многих конструкций. Выбор для исследования цилиндрических оболочек определен их широким применением в современной технике.

Цель диссертационной работы.

1. Проведение теоретических исследований и разработка эффективного алгоритма расчета предельных нагрузок упругопластических цилиндрических оболочек, подкрепленных ребрами жесткости, при нагружении равномерным внешним давлением и осевой сжимающей силой.

2. Разработка приближенной методики определения критических нагрузок подкрепленных цилиндрических оболочек при учете пластических свойств материала, позволяющей проводить расчеты при минимальных затратах времени и исследовать влияние различных параметров оболочки на критические нагрузки.

3. Проведение экспериментальных исследований процесса деформирования и несущей способности цилиндрических оболочек, подкрепленных кольцевыми ребрами, при действии равномерного внешнего давления.

Научная новизна. Решена задача определения предельных нагрузок, характеризующих несущую способность подкрепленных цилиндрических оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности. Разработан вариант математической мо-

НТБ ДНУЖТ

дели для определения критических нагрузок упругопластических цилиндрических оболочек, подкрепленных поперечными ребрами. Разработаны устройство для приема, передачи и обработки данных, получаемых при проведении испытаний и экспериментальная установка для нагружения оболочек равномерным внешним давлением. Проведены экспериментальные исследования деформирования и несущей способности подкрепленных цилиндрических оболочек при нагружении равномерным внешним давлением за пределом упругости материала.

Практическое значение. Разработаны эффективные алгоритмы и на их основе на алгоритмическом языке АЛГОЛ созданы программы расчета критических и предельных нагрузок упругопластических подкрепленных цилиндрических оболочек. При их использовании решен ряд практических задач. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть применены в научно-исследовательских и конструкторских организациях при проектировании и расчетах конструкций, элементами которых являются подкрепленные цилиндрические оболочки. Использование предложенного устройства для передачи и обработки экспериментальных данных позволяет усовершенствовать проведение испытаний и обработку их результатов. Созданная установка для нагружения оболочек может быть применена для испытаний цилиндрических оболочек внешним давлением.

Достоверность теоретических результатов подтверждается сравнением с полученными в работе экспериментальными данными по несущей способности цилиндрических оболочек, подкрепленных поперечными ребрами, при нагружении равномерным внешним давлением за пределом упругости материала (испытано 38 оболочек), и сравнением с экспериментальными и расчетными данными, имеющимися в литературе.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику конструкторских бюро, экономический эффект составляет 31,4 тыс. руб.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

VI Всесоюзной конференции "Экспериментальные исследования

НТБ ДНУЖТ

инженерных сооружений" (Новополоцк, 1986 г.);

Гагаринских научных чтениях по космонавтике и авиации (Москва, 1986 г.);

II Всесоюзном симпозиуме "Устойчивость в механике деформируемого твердого тела" (Калинин, 1986 г.);

II и III Всесоюзных конференциях по механике неоднородных структур (Львов, 1987, 1991 гг.);

Всесоюзном совещании-семинаре молодых ученых "Актуальные проблемы механики оболочек" (Казань, 1988 г.);

Всесоюзном совещании " Перспективы развития и опыт эксплуатации высокопроизводительных вычислительных комплексов" (Днепропетровск, 1988 г.);

семинарах Института технической механики АН Украины (1984-1991 гг.).

П у б л и к а ц и и. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

О б ъ е м р а б о т ы. Диссертация состоит из предисловия, введения, трех глав, заключения, списка литературы (145 наименований) и приложения. Она содержит 128 страниц машинописного текста, 4 таблицы и 21 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В предисловии дана общая характеристика рассматриваемой проблемы, обоснована ее актуальность и приводится краткое содержание диссертации по главам.

Во введении приведен обзор существующих работ по методам и результатам исследований подкрепленных оболочек.

Разработке теоретических основ расчета подкрепленных оболочек посвящены работы Н. П. Абовского, И. Я. Амиро, С. А. Амбарцумяна, В. З. Власова, Г. Д. Гавриленко, Э. И. Григолюка, Л. В. Енджиевского, В. А. Заруцкого, В. П. Ильина, В. В. Кабанова, В. В. Карпова, А. И. Лурье, Ю. В. Немировского, О. И. Теребушко, С. А. Тимашева, D. Bushnell, W. Flugge, G. Gerard, J. Singer и др.

При исследовании подкрепленных оболочек, деформирующихся за пределами упругости, представляют интерес результаты и выводы, полученные при изучении упругих оболочек. Поэтому во введении дан краткий обзор работ, в которых рассматрива-

НТБ ДНУЖТ

лись упругие подкрепленные оболочки.

При многообразии подходов к решению поставленных задач наибольшее распространение получили два из них: с применением конструктивно-анизотропной схемы и с учетом дискретного расположения подкрепляющих ребер. В первом случае жесткость подкреплений распределяется по всей площади оболочки, находящейся между подкреплениями, исходная оболочка заменяется некоторой моделью с осредненной жесткостью. Учет дискретного расположения ребер более сложен, но позволяет получить более точные решения и исследовать такие формы деформирования оболочек, для которых конструктивно-анизотропная схема неприменима. Возможно взаимодействие обоих подходов, например, при решении задач с использованием асимптотического метода на начальном этапе применяется конструктивно-анизотропная схема, а в дальнейшем решение уточняется с учетом дискретного расположения ребер.

Большая часть задач деформирования и устойчивости подкрепленных оболочек решена с использованием численных методов (в первую очередь метода конечных разностей, конечных элементов и их модификаций), что связано с одной стороны со сложностью задач, а с другой стороны с быстрым развитием вычислительной техники. Учет неоднородности физических параметров конструкции, изменяющейся в процессе деформирования, еще более усложняет получение решения. По этой причине во многих работах, где рассматриваются упругопластические подкрепленные оболочки, приняты существенные ограничения относительно реальных свойств материала, диаграммы деформирования, характера распределения пластических деформаций и т. д. Критические нагрузки, как правило, определяются при бифуркационной постановке задачи, что связано со значительной идеализацией поведения системы. Проведенный обзор позволил сделать вывод о необходимости дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований деформирования и определения критических нагрузок подкрепленных цилиндрических оболочек с учетом пластических деформаций.

Первая глава посвящена разработке методики и алгоритма расчета предельных нагрузок упругопластических подкрепленных оболочек. Рассматривается тонкостенная круговая цилиндрическая

НТБ ДНУЖТ

оболочка, подкрепленная продольными (стрингера) и поперечными (шангоуты) ребрами, шарнирно опертая по торцам. Оболочка нагружается равномерно распределенными осевым сжимающим усилием N и боковым внешним давлением P, изменяющимися пропорционально одному параметру. Считается, что подкрепления расположены достаточно часто, что позволяет ввести осредненные характеристики для усилий и моментов. Материал обшивки и подкреплений изотропен, но неоднороден, т. е. все величины, характеризующие механические свойства материала, являются функциями координат. Оболочка может иметь произвольное поле начальных несовершенств срединной поверхности $w^0(x,y)$.

Используются соотношения деформационной теории пластичности. Как известно, эта теория хорошо описывает поведение оболочек при простом и близком к простому нагружении. При этом структура соотношений такова, что можно использовать и другие теории пластичности.

Приращения внутренних усилий и моментов определяются путем интегрирования приращений двухосных напряжений по толщине оболочки и приращений одноосных напряжений по поперечному сечению подкреплений. Приращения внутренних усилий и моментов в подкреплении осредняются по всей области, лежащей между подкреплениями.

$$\Delta N_{ij} = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \Delta\sigma_{ij}\, dz + \frac{1}{\ell_i}\int_{F_i} \Delta\tilde{\sigma}_{ii}\, dF_i$$
$$\Delta M_{ij} = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \Delta\sigma_{ij}\, z\, dz + \frac{1}{\ell_i}\int_{F_i} \Delta\tilde{\sigma}_{ii}\, dF_i \qquad (1)$$

где $\Delta\tilde{\sigma}_{ii}, \Delta\sigma_{ij}$ - соответственно приращения напряжений в подкреплении и в некотором слое оболочки на расстоянии z от поверхности приведения;

ℓ_i - расстояние между подкреплениями;

F_i - площадь поперечного сечения подкрепления (i=1 соответствует стрингеру, i=2 - шангоуту).

Компоненты тензора деформации связаны с компонентами тензора перемещения нелинейными зависимостями. Система уравнений равновесия и совместности деформаций нелинейная относительно функций усилий F и радиального прогиба w получена на основе

НТБ ДНУЖТ

соотношений теории пологих оболочек. Для линеаризации уравнений использован метод последовательных нагружений. Суть метода состоит в поэтапном приращении нагрузки и вовязи с этим поэтапном изменении прогиба и функции усилий. Величина приращения нагрузки выбирается из условия малости вызываемых приращений Δw и ΔF. После каждого приращения нагрузки учитывается изменение геометрической формы, внутренних усилий и при необходимости корректируются жесткостные параметры системы. Параллельно применяется метод переменных параметров упругости. В результате получается система уравнений смешанного типа, линейная относительно приращений функций Δw и ΔF на i-том этапе нагружения

$$L_1(\Delta\Phi_i) + L_2(\Delta w_i) + \Delta p_i = 0\ ;$$
$$L_3(\Delta\Phi_i) + L_4(\Delta w_i) = 0, \qquad (2)$$

где $L_j(\varphi)$ -дифференциальные операторы, зависящие от коэффициентов $B^{(1)}_{ijkn}, B^{(2)}_{ijkn}, C^{(1)}_{ijkn}, C^{(2)}_{ijkn}$, связывающих приращения напряжений с приращениями деформаций в упругопластической области; Δp_i-параметр нагрузки, включающий сжимающее усилие и внешнее давление. Коэффициенты $(B^{(1)}, B^{(2)}, C^{(1)}, C^{(2)})_{ijkn}$ определяются через характеристики материала и геометрические параметры обшивки и подкреплений.

Для решения системы уравнений применен метод Бубнова-Галеркина. функции w, Δw, w^*, F, ΔF и жесткостные коэффициенты $(B^{(1)}, B^{(2)}, C^{(1)}, C^{(2)})_{ijkn}$ аппроксимируются следующими выражениями:

$$w(x,y) = f_0 + f_1 \sin\alpha x \sin\beta y + f_2 \sin^2\alpha x\ ;$$
$$\Delta w_i(x,y) = f_{0i} + f_{1i} \sin\alpha x \sin\beta y + f_{2i} \sin^2\alpha x\ ;$$
$$w^*(x,y) = f_1^* \sin\alpha x \sin\beta y\ ;$$
$$F(x,y) = f \sin\alpha x \sin\beta y - N_{11}^* y^2/2 - N_{22}^* x^2/2\ ;$$
$$\Delta F_i(x,y) = f_1 \sin\alpha x \sin\beta y - \Delta N_{11i}^* y^2/2 - \Delta N_{22i}^* x^2/2\ ;$$
$$B^{(1)}_{ijkn} = B^{(1)}_{ijkn}(x_0) + \left(B^{(1)}_{ijkn}(x_1) - B^{(1)}_{ijkn}(x_0)\right)\sin^2\alpha x \sin^2\beta y\ ;$$
$$B^{(2)}_{ijkn} = B^{(2)}_{ijkn}(x_1) \sin\alpha x \sin\beta y$$
$$C^{(1)}_{ijkn} = C^{(1)}_{ijkn}(x_1) \sin\alpha x \sin\beta y\ ,$$
$$C^{(2)}_{ijkn} = C^{(2)}_{ijkn}(x_0) + \left(C^{(2)}_{ijkn}(x_1) - C^{(2)}_{ijkn}(x_0)\right)\sin^2\alpha x \sin^2\beta y\ ,$$

НТБ ДНУЖТ

где $\alpha = m\pi/L$; $\beta = n/R$; $N_{11}^{\circ} = N/2\pi R$; $N_{22}^{\circ} = PR$

m -число полуволн вдоль образующей;

n -число полных волн в поперечном сечении оболочки.

Жесткостные коэффициенты определяются в сечениях $X_1 = 0, L$ и $X_0 = L/2m$.

В результате интегрирования приходим к системе трех линейных алгебраических уравнений относительно амплитудных величин f_{1i}, f_{2i}, f_i в разложениях искомых функций Δw и ΔF.

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N} f_{1i} \; ; \qquad f_2 = \sum_{i=1}^{N} f_{2i} \; ; \qquad f = \sum_{i=1}^{N} f_i$$

Алгоритм расчета предельной нагрузки строится следующим образом. Задается приращение внешним нагрузкам. На каждом этапе нагружения учитывается изменение жесткостных параметров (в случае наличия пластических деформаций) на основании решения для предыдущего этапа. При использовании метода переменных параметров упругости значения жесткостных параметров в конце предыдущего этапа нагружения берутся в качестве нулевого приближения для последующего. Вычисляются коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений и в результате ее решения находятся амплитудные значения f_{1i} , f_{2i} , f_i в разложении функций усилий и прогиба. Для данного приращения нагрузок определяются вызываемые им приращения деформаций и кривизн. По результатам решения строится зависимость "комбинация нагрузок-прогиб" (поверхность равновесных состояний) в характерном сечении оболочки. Критерием исчерпания несущей способности служит достижение нагрузкой предельной точки. Предельные точки находятся для ряда значений m и n. Минимальная из найденных нагрузок характеризует несущую способность подкрепленной оболочки.

Приведена блок-схема разработанной программы расчета предельных нагрузок.

Методики расчета критических нагрузок, определяющих устойчивость неупругих подкрепленных оболочек, как правило, сложны, громоздки и реализованы в виде вычислительных программных комплексов. В этих случаях исследование влияния различных параметров, входящих в задачу, возможно только путем анализа достаточно большого объема расчетных данных.

НТБ ДНУЖТ

Во второй главе приведены некоторые простые зависимости, позволяющие определять критические нагрузки упругопластических цилиндрических оболочек, подкрепленных ребрами одного направления. Такие зависимости необходимы для получения начального приближения при итерационных расчетах, при расчетах большого числа различных вариантов и др. С их помощью можно проводить анализ влияния на критические нагрузки различных входящих в формулу величин.

Использован подход, сводящий определение критической нагрузки подкрепленной оболочки к определению критической нагрузки кольца с поперечным сечением, заштрихованным на рис. 1, находящегося на упругом основании с коэффициентом жесткости C. Введение такого основания заменяет для рассматриваемого кольца влияние отброшенной части оболочки. Жесткость упругого основания определяется из соотношения

$$C = \frac{(n^2-1)\,\bar{\ell}}{R'}\,p_0 \,,$$

где n - число окружных волн;
$\bar{\ell}$ - расстояние между подкреплениями; $\bar{\ell} = \ell + \delta$;
p_0 - критическая нагрузка гладкой оболочки;
$R' = R \pm \delta/2$ (знак "плюс" берется при наружном подкреплении; "минус" - при внутреннем).

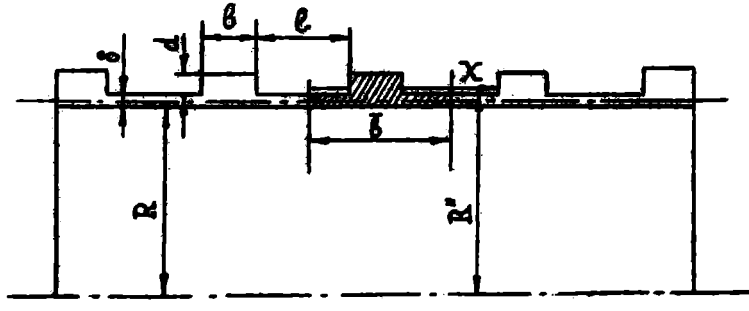

Рис. 1

Критическая нагрузка общей потери устойчивости подкрепленной оболочки определяется из следующей зависимости

НТБ ДНУЖТ

$$P_{кр} = \alpha_1 \frac{(n^2-1) E_к J_{\bar{b}}}{\bar{b} R''^3} + \alpha_2 P_0 , \qquad (3)$$

где $\alpha_1 = \bar{b}/\bar{l}$; $\alpha_2 = R''/R'$;

R'' - расстояние от оси оболочки до центра тяжести выделенного сечения (рис. 1);

$J_{\bar{b}}$ - момент инерции поперечного сечения шпангоута с присоединенным участком оболочки длиной $\bar{b}$ относительно оси X, проходящей через центр тяжести выделенного сечения;

$E_к$ - касательный модуль на диаграмме деформирования материала, соответствующий нагрузке потери устойчивости.

Для определения длины "работающего" совместно со шпангоутом участка оболочки $\bar{b}$ целесообразно использовать формулу для активной зоны действия краевого эффекта:

$$\bar{b} = b + 1{,}6\sqrt{R\delta} \qquad (4)$$

Проведенные расчеты показали, что результаты, полученные с использованием более точных, но громоздких выражений для полного краевого эффекта и выражения (4) близки для широкого диапазона геометрических параметров оболочек.

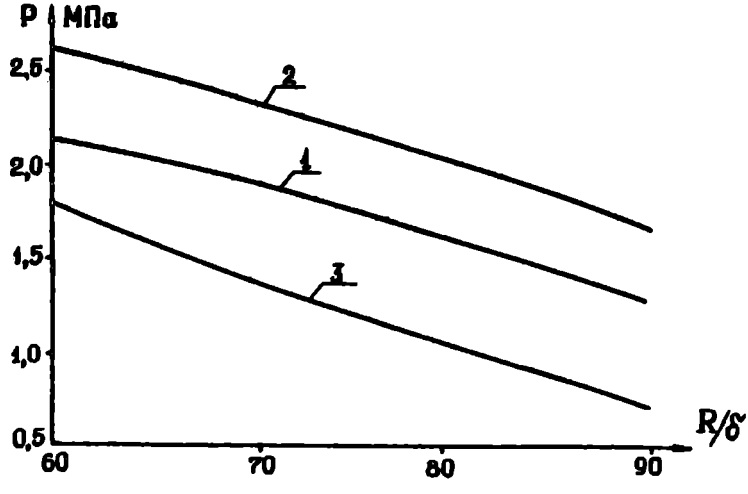

Рис. 2

НТБ ДНУЖТ

На основании полученных зависимостей были разработаны алгоритм и программа расчета критических нагрузок подкрепленных шангоутами цилиндрических оболочек. Программа составлена на языке АЛГОЛ и реализована на ЭВМ ЕЭСМ-6. На рис. 2 приведены зависимости критического давления от толщины обшивки для оболочек с L/R=2, подкрепленных тремя шангоутами сечением 2,2 х 3,4 мм. Кривая 1 соответствует расчету по приближенной методике, 2 - по соотношениям M. E. Lunchick'a, а 3 - по формуле Д. М. Муляра, полученной на основании анализа экспериментальных данных.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса упругопластического деформирования и определения критических нагрузок цилиндрических оболочек, подкрепленных равноотстоящими шангоутами прямоугольного поперечного сечения. Описаны оборудование, используемое при проведении экспериментов, методика испытаний и технология изготовления модельных оболочек.

Модельные оболочки вытачивались совместно со шангоутами из толстостенных труб, изготовленных из материала АМг-6М. Были получены оболочки с наружным и внутренним расположением подкрепляющих ребер. Для каждого варианта количество ребер изменялось от 1 до 17 (L/R=2). У торцов оболочек вытачивались более мощные шангоуты, необходимые для герметизации внешнего давления. Всего испытано 38 оболочек.

Оболочки нагружались жидкостью (водой). Контроль величины внешнего давления осуществлялся манометром, имеющим шкалу с ценой деления 0,02 МПа.

Для определения характера волнообразования проводилось тензометрирование оболочек. Тензодатчики для замера окружных деформаций размещались на внутренней поверхности оболочек. Контролировались деформации под шангоутом (или рядом с ним при внутреннем подкреплении) и в сечении между шангоутами, вблизи среднего сечения оболочки (L/2). Описана разработанная установка для приема-передачи и обработки измерительной информации.

На рис. 3 а) б) представлены результаты, характеризующие процесс деформирования оболочек, подкрепленных соответственно

НТБ ДНУЖТ

1 и 4 внешними шангоутами. Графические зависимости построены для этапа нагружения, непосредственно предшествовавшего исчерпанию несущей способности. Пунктирные линии соответствуют развитию деформаций в сечении со шангоутом, а сплошные - между шангоутами.

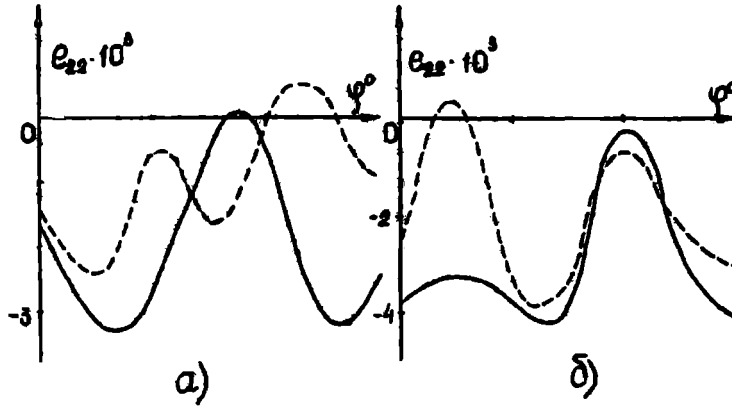

Рис. 3

Анализ данных тензометрирования позволил заключить следующее. При деформировании оболочки с одним шангоутом произошло сильное развитие местной формы потери устойчивости. Из-за малой изгибной жесткости шангоута происходит его деформирование вследствие развития деформаций, определяемых формами волнообразования при местной потере устойчивости, и это приводит к тому, что кривизна кривой, определяющей зависимость $e_{22}-\varphi$, полученная для сечения со шангоутом, в два раза чаще меняет знак по сравнению с аналогичной для сечения между шангоутами. При большем числе шангоутов происходит развитие общей формы потери устойчивости. В этом случае картины развития деформаций под шангоутами и между ними качественно совпадают. Аналогичные результаты получены и для оболочек с внутренним подкреплением.

С помощью разработанных в главах 1, 2 алгоритмов определены критические и предельные нагрузки цилиндрических оболо-

НТБ ДНУЖТ

чек, подкрепленных равноотстоящими шпангоутами прямоугольного поперечного сечения, при нагружении равномерным внешним давлением. Результаты, полученные при использовании вышеприведенных алгоритмов, сравнивались с данными проведенных экспериментов. При расчетах была использована реальная диаграмма сжатия $\sigma_i - \varepsilon_i$ (рис. 4), полученная на основе экспериментальных данных для образцов из АМг-6М. Начальный шаг нагружения - $\Delta P = 0{,}01$ МПа.

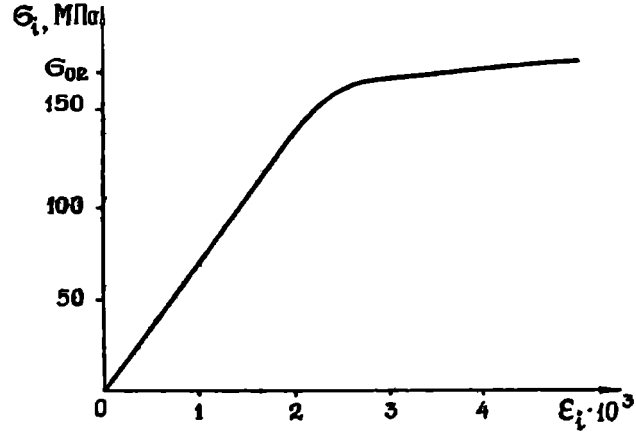

Рис. 4

Анализ полученных результатов показывает, что расчетные значения нагрузок, определяемых на основании зависимостей, приведенных во второй главе, незначительно отличаются от экспериментальных при количестве шпангоутов от 1 до 5 (для данных параметров оболочек). При большем количестве шпангоутов различие возрастает. Это связано с тем, что в этом случае вычисленная длина участка оболочки, "работающего" совместно со шпангоутом, начинает превышать расстояние между шпангоутами. Для таких случаев использование приближенной методики нецелесообразно и следует проводить расчет предельных нагрузок (по методике, описанной в главе 1). Отношение величин предельных нагрузок к экспериментальным для оболочек, подкрепленных часто расположенными шпангоутами (от 4 до 17) составляет 0.86 - 1.02.

НТБ ДНУЖТ

Результаты расчетов по определению предельных нагрузок сравнивались также с экспериментальными данными, полученными Botchot и Rejnolds, которые испытывали подкрепленные цилиндрические оболочки из дюралюминия, нагруженные внешним давлением, и расчетными данными Tsang и Harding, определявшими критические нагрузки этих же оболочек с использованием теории предельного равновесия. Отмечено хорошее соответствие (расхождение не более 7%).

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика и алгоритм решения задачи определения предельных нагрузок, характеризующих несущую способность подкрепленных цилиндрических оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности, при нагружении осевой сжимающей силой и внешним давлением.

2. Разработаны математическая модель, методика и алгоритм определения критических нагрузок цилиндрических упругопластических оболочек, подкрепленных поперечными ребрами. Установлены границы применимости полученных соотношений.

3. На основе разработанных алгоритмов созданы программы расчета на алгоритмическом языке АЛГОЛ. Программы реализованы на ЭВМ БЭСМ-6.

4. Проведен цикл экспериментальных исследований деформирования и достижения предельных состояний цилиндрических оболочек, подкрепленных различным количеством поперечных ребер, при нагружении за пределом упругости материала. Обнаружен различный характер деформирования оболочек в зависимости от их параметров.

5. Созданы установка для испытания оболочек на действие равномерного внешнего давления и устройство для приема-передачи и обработки измерительной информации, получаемой при проведении экспериментов.

6. Проведенное сравнение результатов расчета с экспериментальными данными дает хорошее совпадение, что подтверждает

НТБ ДНУЖТ

приемлемость разработанных методик для описания упругопластического поведения и предельных состояний подкрепленных цилиндрических оболочек. Проанализирована возможность применения разработанных подходов.

7. Разработанные и реализованные программы расчетов предельных состояний и устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек, нагружаемых за пределом упругости внедрены в промышленность и использованы при расчетах реальных конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Дудник И.Ф., Репринцев А.В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических цилиндрических оболочек, подкрепленных кольцевыми ребрами, при внешнем давлении// Тез. докл. II Всес. симп. "Устойчивость в механике деформируемого твердого тела".- Калинин: КГУ, 1986.- С. 33-34.

2. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Демешко М.Ф., Репринцев А.В. Цикл экспериментальных исследований модельных оболочек с неоднородностями формы и нагружения//Тез. докл. VI Всес. конф. "Экспериментальные исследования инженерных сооружений".- Новополоцк: Новополоцк. политех. ин-т, 1986.- С. 107-108.

3. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Репринцев А.В. Устойчивость и предельное состояние неупругих подкрепленных цилиндрических оболочек// Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации.- М.: Наука.- 1987.- С. 166.

4. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Репринцев А.В. Предельное состояние цилиндрических оболочек неоднородной структуры // Механика неоднородных структур. Тез. докл. II Всес. конф.- Львов: ЛГУ, 1987.- С. 95-96.

5. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Дудник И.Ф., Репринцев А.В. Устойчивость и предельные состояния неупругих цилиндрических оболочек, подкрепленных кольцевыми ребрами, при внешнем давлении// Материалы II Всес. симп. "Устойчивость в механике деформируемого твердого тела".- Калинин: КГУ, 1987.- С. 114-118.

6. Гудрамович В.С., Репринцев А.В. Устойчивость и несущая способность упругопластических подкрепленных цилиндрических

Днепропетровский институт инженеров жел. дор. транспорта им. М.И. Калинина БИБЛИОТЕКА

ученых "Актуальные проблемы механики оболочек". - Казань: КИСИ, 1988. - С. 60.

7. А. с. 1385011 СССР, МКИ G 01 N 3/10. Установка для испытания твердых тел при трехмерном напряженном состоянии/ Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Демешко М.Ф., Репринцев А.В.// Открытия. Изобретения. - 1988. - N 12. - С. 169.

8. Гудрамович В.С., Галкин В.Ф., Репринцев А.В. и др. Автоматизация процесса получения и обработки на ЭЦВМ БЭСМ-6 данных экспериментального исследования прочностных характеристик элементов конструкций// Перспективы развития и опыт эксплуатации высокопроизводительных вычислительных комплексов. Материалы Всес. совещ. Днепропетровск: ДГУ, 1989. - С. 157-159.

9. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Муляр Ю.М., Репринцев А.В. Критические нагрузки подкрепленных кольцевыми шангоутами неупругих цилиндрических оболочек при действии внешнего давления// Несущая способность и долговечность конструкций. - Киев: Наук. думка. - 1990. - С. 45-51.

10. Репринцев А.В. Экспериментальные исследования упругопластического деформирования и несущей способности конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек // Механика неоднородных структур. Тез. докл. III Всес. конф. - Львов: ЛГУ, 1991. - С. 282.

Ротапринт ДГУ Заказ № 33 Тираж 100

НТБ ДНУЖТ

Сканировала Камянская Н.А.