

М 432343

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи
УДК.539.5

АНДРОЩЕНКО АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОРТОТРОПНЫХ БЕЗМОМЕНТНЫХ ОБОЛОЧЕК
ВРАЩЕНИЯ ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГОСТИ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

(01.02.06-Динамика, прочность и надежность машин, приборов
и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1985

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре
"Динамика и прочность машин".

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Малинин Н.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
Ширшов А.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Григорьев А.С.
кандидат технических наук
Панов А.Д.

Ведущая организация - указана в решении Совета

Защита состоится " _____ " _____ 1985 г. в _____ ч.
на заседании специализированного Совета "Машиностроение"
(КОСЗ.15.II.) Московского Высшего Технического Училища
им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская
ул., д.5, Большой Ученый Совет.

Ваш

ью, просьба

выс

С д

ВТУ им. Н.Э.

Бау

Авт

учи

М432343

(Попов П.К.)

Д-9719

Подп.

из. зак. 966

Типогр

Актуальность темы. В современном машиностроении широкое применение получили конструкции, элементы которых выполнены в виде тонкостенных оболочек. Тонкостенные конструкции используются как емкости для топлива, сжатого и сжиженного азота, конструктивные элементы приборов точного машиностроения, чувствительные датчики, различного рода предохранители. Широкое применение тонкостенные конструкции, нагруженные внутренним давлением и осевой растягивающей силой, получили в гидравлических системах авиационной техники, реакторах атомных установок, в химическом машиностроении и ряде других случаев.

Повышение эффективности общественного производства, интенсивное развитие науки и техники вызывают увеличение нагрузки на элементы конструкций при одновременном уменьшении их массы. В авиационной промышленности, например, решается задача обеспечения работоспособности трубопроводов в условиях повышенных (до 28 МПа) давлений. Надежность тонкостенных конструкций при этом является одной из важнейших проблем.

Возрастание требования к безопасности тонкостенных конструкций привели к применению новых материалов — сплавов на основе титана, алюминия, магния. Их высокие прочностные и эксплуатационные свойства в сочетании с малой плотностью позволяют создавать надежные и долговечные изделия. Эти материалы обладают ярко выраженной анизотропией механических свойств, обусловленной их кристаллографической структурой и особенностями технологии изготовления тонкостенных конструкций. Широкое применение в промышленности высокопрочных материалов определяет актуальность задачи изучения напряженно-деформированного состояния ортотропных осесимметричных оболочек.

Определение теоретическим путем напряженно-деформированно-

I.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1432343

Андрющенко А.Г. Разработка



го состояния в условиях эксплуатации и предельно^ю нагрузки, которую может выдержать конструкция без разрушения, является одной из актуальнейших задач расчетной практики. Решение ее позволяет использовать вместо расчетов по допускаемым напряжениям расчеты по несущей способности конструкций.

В настоящее время широкое распространение получили методы изготовления тонкостенных конструкций при помощи пластического деформирования. Во многих случаях осесимметричная заготовка подвергается воздействию внутреннего давления и осевой растягивающей силы. Законы приложения нагрузок в процессе деформирования могут быть самыми разнообразными. И в этом случае определение расчетным путем предельно^ю нагрузки, напряженно-деформированного состояния и максимально^ю нагрузки, при которой сохраняются заданные условия деформирования, является весьма важным для создания эффективных и экономичных технологических процессов. Однако, до настоящего времени процессы деформирования ортотропных тонкостенных оболочек полностью не исследованы, отсутствует достаточно точное решение задачи деформирования тонкостенных оболочек, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей силой.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является создание методики численного исследования процесса деформирования тонкостенных ортотропных оболочек вращения, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей силой, пригодной для решения технологических задач и определения несущей способности.

Научная новизна. Разработана методика численного исследования деформирования тонкостенных ортотропных оболочек вращения, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей

оплой. В качестве расчетной схемы рассматривалась безмоментная ортотропная оболочка вращения конечной длины с шпильками, которые могут перемещаться в осевом направлении. При выводе системы дифференциальных уравнений, описывающей деформирование оболочки, не накладывалось ограничений на величину деформаций, на форму меридиана и закон изменения толщины вдоль меридиана, на вид уравнения диаграммы деформирования, а также на соотношения между внутренним давлением и осевой растягивающей силой. При решении учтены упругие деформации.

Решение ведется шаговым методом. На каждом шаге основная система уравнений решается численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом вдоль меридиана.

Разработана методика определения коэффициентов анизотропии материала при испытании тонкостенных цилиндрических образцов.

Достоверность результатов подтверждена численными экспериментами по оценке сходимости алгоритма, сравнением с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов и сопоставлением с экспериментом.

Практическая ценность и внедрение. Разработанный алгоритм применен для исследования больших деформаций ортотропных и изотропных оболочек начальной цилиндрической формы при различных вариантах нагружения внутренним давлением и осевой растягивающей силой. Проведено численное исследование влияния на процесс деформирования анизотропии механических свойств материала, истории нагружения и длины оболочки. Проведен анализ технологических операций, связанных с изготовлением осесимметричных тонкостенных деталей при помощи нагружения цилиндрических заготовок внутренним давлением и осевой силой, как при свободном деформировании так и при формоизменении в матрицу. Получены

зависимости прелестной нагрузки, формы меридиана и распределения толщины и напряжений вдоль меридиана от нагрузки при различных параметрах деформирования. Показано, что результаты, полученные по двум вариантам теории пластического течения ортотропных материалов, практически совпадают.

Полученные результаты рекомендуются для обоснованного выбора геометрических параметров и нагрузки, действующей на тонкостенную оболочку. Разработанный алгоритм внедрен в расчетную практику предприятия.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и основных выводов на 162 страницах, включая 60 рисунков, содержит список литературы из 123 наименования и приложения на 10 страницах.

Апробация работы. Результаты доложены на научно-технических семинарах в МВТУ им. Баумана и опубликованы в 4 статьях.

Содержание работы. Во введении излагается актуальность проблемы, цель работы, ее практическая значимость.

В первой главе приведен анализ работ, посвященных исследованию больших деформаций тонкостенных осесимметричных оболочек.

Большой вклад в развитие теории больших деформаций изотропных безмоментных оболочек вращения конечно пластичности, нагруженных внутренним давлением, сделан А.С. Григорьевым и его учениками: В.М. Трушиной, Л.М. Сутнатулиной, Г. Гасяком и другими. А.С. Григорьевым сформулированы исходные положения, получена полная система уравнений, описывающих равновесие оболочки в деформированном состоянии, проведено обширное исследование оболочек с произвольной формой меридиана при различных вариантах основного закона деформирования. Некоторые частные задачи де-

формирования тонкостенных оболочек рассматривались в работах В.Э.Магулы, А.А.Маркина, З.Маршняка, М.А.Гудиса, Л.М.Шертукова, М.Саломона, Б.Стораккеса и других авторов.

Анализу деформирования ортотропных оболочек конечной длины посвящено сравнительно мало работ. Фелликом и Мамецовым было рассмотрено приближенное решение при заданной форме оболочки в деформированном состоянии. Попытка получить точное решение была сделана Оркшлем. Однако, при решении поставленной задачи им допущена ошибка, замеченная Гасяком.

До настоящего времени отсутствуют работы, посвященные расчету тонкостенных оболочек конечной длины, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей силой.

Во второй главе приведены исходные зависимости и соотношения, на основании которых получена полная система уравнений, описывающая деформирования тонкостенных осесимметричных ортотропных оболочек. В работе рассматриваются большие деформации безмоментных тонкостенных оболочек вращения с дилатами, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей силой. Дилата ограничивают (или полностью запрещают) радиальные перемещения. В осевом направлении дилата могут перемещаться или могут быть закреплены. Материал оболочки несжимаемый, ортотропный. Главные направления анизотропии совпадают с меридиональным, окружным и перпендикулярным срединной поверхности направлениями. Оболочка в исходном состоянии и в процессе деформирования имеет форму тела, образованного вращением произвольного гладкого контура, с толщиной, переменной вдоль меридиана. Не накладываются ограничений на величины деформаций, на форму поверхности, по которой деформируется оболочка, на закон изменения толщины вдоль меридиана и на закон изменения возрастаю-

лей нагрузки. В основу решения положена теория пластического течения анизотропного (ортотропного) материала с изотропным упрочнением. Основные уравнения получены при использовании двух вариантов теории: теории энергетического упрочнения (Хилла) и теории деформационного упрочнения (Дьяконович и Чакраберти).

С целью упрочнения решение проводится шаговым методом с шагом по деформации.

Рассматриваются два близких деформированных состояния, таких, что при переходе к новому деформированному состоянию от предыдущего приращения деформаций малы. Напряжения в новом деформированном состоянии отличаются от напряжений в предыдущем деформированном состоянии на величину приращения напряжений $\sigma_m = \sigma_m^* + \Delta \sigma_m$, $\sigma_t = \sigma_t^* + \Delta \sigma_t$. Индексом * отмечены значения, относящиеся к предыдущему деформированному состоянию.

После преобразования исходных уравнений полная система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние оболочки, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} F + \rho \pi z^2 &= 2 \pi z h \sin \theta \sigma_{\text{sch}} \frac{g}{K} \\ \frac{d\theta}{ds} &= \left(\frac{2 \rho \pi z^2}{F + \rho \pi z^2} - \frac{1}{g} \right) \frac{\sin \theta}{z} \\ \frac{dz}{ds} &= \cos \theta \\ \Delta \varepsilon_t &= \frac{z}{z^*} - 1 \\ \sigma_{\text{sch}} &= \sigma_T (1 + C \int d\varepsilon_{\text{sch}}^p)^m \\ h &= h^* (1 - \Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_m) \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

$$g = \frac{\Delta \varepsilon_m}{\varepsilon_m} + \frac{f_1}{f_2} \left(1 - \frac{\Delta \varepsilon_t}{\varepsilon_t} \right)$$

$$f_1 = R_m(R_t+1)(\Delta \varepsilon_m - \Delta \varepsilon_m^e) + R_m R_t (\Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_t^e)$$

$$f_2 = (R_m+1)R_t(\Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_t^e) + R_m R_t (\Delta \varepsilon_m - \Delta \varepsilon_m^e)$$

Выражение для κ зависит от используемого варианта теории пластичности. По теории Хилла

$$\kappa = \sqrt{\frac{3[R_m R_t (g-1)^2 + R_m + R_t g^2]}{2(R_m + R_t + 1)}}$$

по теории деформационного упрочнения

$$\kappa = \sqrt{\frac{R_m(R_t+1) + R_t(R_m+1)g^2 - 2R_m R_t g}{R_t(R_m+1)}}$$

Здесь F - осевая растягивающая сила, p - внутреннее давление, z - радиус оболочки, h - толщина оболочки, θ - угол между нормалью к срединной поверхности и осью вращения, ds - длина элемента дуги меридиана, $\Delta \varepsilon_t$ - приращение деформации в окружном направлении, $\Delta \varepsilon_m$ - приращение деформации в меридиональном направлении, $\varepsilon_{эк}$ - эквивалентное напряжение, $d\varepsilon_{эк}$ - приращение эквивалентной деформации, ε_T - предел текучести материала, ν, m - коэффициенты, R_m и R_t - коэффициенты анизотропии материала.

Эта система уравнений относительно неизвестных z и θ с граничными условиями $z=0$ $z=z_k$, и $z=L$ $z=z_k z$ определяет краевую задачу, которая решается численно методом стрельбы.

При переходе к новому деформированному состоянию задается угол наклона меридиана оболочки у торца и подбираются значения нагрузки, при которых выполняется второе граничное ус-

лоние. Решение ведется до достижения максимума нагрузки. За исходное состояние принимается деформированное состояние упругой оболочки, в наиболее опасной точке которого достигнуто состояние текучести. Начиная со второго этапа деформирования в оболочке развиваются пластические деформации, однако часть оболочки остается упругой. Поэтому при переходе к следующему этапу деформирования решение ведется при помощи системы уравнений (I), начиная с той точки меридиана, в которой достигается состояние текучести. Система уравнений интегрируется методом Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом вдоль меридиана. Для этого меридиан оболочки в недеформированном состоянии разбивается на n участков. На первом участке разбиение сделано более мелким в связи с резким изменением кривизны меридиана у торца. Так как в уравнения (I) входят значения $\Delta \sigma_r$ и $\Delta \sigma_{\theta}$, для определения которых необходимо знать напряжения в новом деформированном состоянии, то при решении используется итерационный процесс. В первом приближении принимается $\Delta \sigma_r = \Delta \sigma_{\theta} = 0$. После определения нагрузки для данного деформированного состояния в узловых точках подсчитываются напряжения и приращения напряжений $\Delta \sigma_r$ и $\Delta \sigma_{\theta}$. После чего выполняется новое приближение. Когда разность между значениями напряжений во всех узловых точках становится меньше принятого допуска итерационный процесс прекращается и осуществляется переход к новому деформированному состоянию.

В третьей главе изложены алгоритмы решения задачи и проверка достоверности получаемых результатов. Исследована несущая способность изотропной оболочки при различных вариантах нагружения внутренним давлением и осевой растягивающей силой и несущая способность ортотропной оболочки, нагру-

венной внутренним давлением. Рассмотрен процесс раздутия цилиндрической заготовки со свободными днгами в матрице, ограничивающей окружные перемещения, а также деформирование оболочки с закрепленными торцами.

В процессе отработки алгоритма исследовалось влияние на точность счета количества участков разделения меридиана и величины шага деформирования (повращения угла наклона меридиана у торца). При варьировании одного параметра второй оставался постоянным. Выяснено, что в рассматриваемых пределах значения n и $\Delta\theta$ практически не влияют на точность счета. Однако время счета существенно зависит от этих параметров. На основании проведенного исследования для дальнейших расчетов были приняты $n = 20$ и $\Delta\theta = 0,02$ радиана.

Достоверность получаемых результатов проверялась сопоставлением с известными исследованиями больших деформаций тонкостенных цилиндрических оболочек, нагруженных внутренним давлением. Сравнение с теоретическим решением Гасика и экспериментальным исследованием Саломона изотропных цилиндрических оболочек показывает хорошее совпадение результатов.

Несулая способность оболочек при различных вариантах нагружения исследовалась на примере расчета изотропной цилиндрической оболочки. Рассматривались следующие варианты нагружения: 1) внутреннее давление возрастает при постоянном значении осевой силы, 2) внутреннее давление и осевая сила возрастает пропорционально, 3) осевая сила возрастает при постоянном значении внутреннего давления. Результаты исследования показали, что история нагружения оказывает существенное влияние на деформирование оболочки.

Теоретическое исследование напряженно-деформированного

состояния проводилось на примере расчета тонкостенной ортотропной цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением, что соответствует экспериментальному исследованию, описанному выше. В расчетах принимались следующие геометрические параметры: $L = \frac{L_0}{z_0} = 1, 2, 4$ и $h = \frac{h_0}{z_0} = 0,025$. Постоянные в уравнениях диаграммы деформирования ортотропного материала за пределами упругости и коэффициенты анизотропии принимались равными $\sigma_T = 480$ МПа, $\epsilon = 45,1$, $m = 0,10$, $R_{\theta\theta} = 0,78$, $R_t = 0,57$ (что соответствует сплаву ОТ4) и $\sigma_T = 470$ МПа, $\epsilon = 25,7$, $m = 0,068$, $R_{\theta\theta} = 0,84$, $R_t = 0,43$ (соответствует сплаву ИТ-7М).

Для проведения теоретического исследования деформирования ортотропной тонкостенной оболочки необходимо иметь коэффициенты анизотропии и диаграмму деформирования материала. В работе использовались коэффициенты анизотропии и диаграмма деформирования материала, полученные в эксперименте. На основании теоретического исследования несущей способности установлено, что использование вместо диаграммы деформирования при расчете конструкций из ортотропных материалов диаграммы растяжения (т.е. пренебрежение анизотропией механических свойств) приводит к значительным погрешностям.

Изложен алгоритм решения технологических задач получения оболочки заданной формы. Форма детали определяется формой матрицы. Заготовка — цилиндрическая тонкостенная оболочка с закрепленными или свободными торцами. Рассмотрен пример расчета. Показана зависимость осевой силы от радиуса в среднем сечении оболочки и закон изменения толщины детали по длине меридиана.

В четвертой главе изложена методика приближенного решения поставленной задачи.

В пятой главе приведена методика определения коэффициентов анизотропии материала непосредственно на цилиндрических образцах, изготовленных из тонкостенных труб, и экспериментальная проверка разработанной методики определения больших деформаций тонкостенных оболочек. Для этого была спроектирована и изготовлена установка, позволяющая испытать тонкостенные цилиндрические образцы, нагруженные внутренним давлением. Эксперименты проводились на цилиндрических трубчатых образцах из титановых сплавов OT-4 и ПТ-7М. Трубы в состоянии поставки имели внешний диаметр 42 мм и толщину 2 мм. С целью уменьшения рабочего давления в эксперименте толщина была уменьшена до 0,5 мм. Коэффициент R_t определялся по результатам испытаний на одноосное окружное растяжение. Для этого использовались образцы без дна с заглушками. По результатам испытаний на той же установке длинных трубок с дном, т.е. в условиях двукосного растяжения, определялся коэффициент $R_{\perp}$. В целях контроля коэффициент анизотропии $R_{\perp}$ определялся также по результатам испытаний на одноосное осевое растяжение. Было выяснено, что значения коэффициентов анизотропии материала достаточно быстро стабилизируются и остаются постоянными в процессе деформирования. Преимуществом определения коэффициентов анизотропии при испытании трубчатых образцов на одноосное окружное и двукосное растяжение является использование одной установки и одной методики проведения эксперимента. Диаграмма деформирования материала строилась по результатам испытаний на одноосное осевое растяжение.

При исследовании ортотропных оболочек, нагруженных внутренним давлением, измерялось изменение радиуса в среднем сечении оболочки в зависимости от приложенного давления.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показывает хорошее совпадение результатов, что позволяет сделать вывод о правильности разработанной методики.

Основные выводы:

1. На основании геометрических, статических и физических соотношений получена система дифференциальных уравнений, описывающая деформирование ортотропных осесимметричных тонкостенных безмоментных оболочек, нагруженных внутренним давлением и осевой растягивающей силой. Отличие от ранее применявшихся состоит в следующем:

1.1. Никаких ограничений на величину деформаций, на форму меридиана в деформированном состоянии, на закон изменения начальной толщины вдоль меридиана оболочки, а также на вид уравнения диаграммы деформирования не накладывается.

1.2. Соотношения между внутренним давлением и осевой растягивающей силой в процессе деформирования могут быть произвольными.

1.3. При решении учитываются упругие деформации.

2. Основная система уравнений сводится к задаче Коши, которая решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом вдоль меридиана. Решение получено последовательно для различных этапов деформирования до потери несущей способности оболочки.

3. Разработанный алгоритм применен для исследования больших деформаций ортотропных и изотропных оболочек начальной цилиндрической формы при различных вариантах нагружения внутренним давлением и осевой растягивающей силой, а также для решения технологических задач формоизменения тонкостенных конструкций.

4. Проведено численное исследование влияния на процесс деформирования различных параметров, которое позволило выявить некоторые общие закономерности:

4.1. Анизотропия механических свойств материала оказывает значительное влияние на процесс деформирования.

4.2. Несущая способность оболочки существенно зависит от истории нагружения внутренним давлением и осевой растягивающей силой.

4.3. Оболочку можно считать бесконечно длинной при длине более трех ее диаметров.

4.4. Получены зависимости напряженно-деформированного состояния, формы оболочки и распределение толщин вдоль меридиана от нагрузки с учетом и без учета анизотропии механических свойств материала.

5. Рассмотрены большие деформации оболочек переменной начальной толщины. Показано, что закон изменения начальной толщины существенно влияет на несущую способность и форму меридиана оболочки.

6. Проведено решение задачи определения больших деформаций для ортотропной цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением, по двум вариантам теории пластического течения ортотропных материалов. Показано, что результаты, полученные по двум вариантам, практически совпадают.

7. Получено приближенное решение задачи определения больших деформаций ортотропных тонкостенных осесимметричных оболочек. Показано, что приближенное решение может быть использовано для оценки несущей способности оболочек.

8. Разработана методика определения коэффициентов ани-

анотропии материала при испытании тонкостенных цилиндрических образцов. Показано, что коэффициенты анизотропии материала остаются постоянными в процессе деформирования. Это подтверждает справедливость применения теории течения ортотропных материалов с изотропными упрочнениями Хилла при расчете процессов монотонного деформирования элементов конструкций из титановых сплавов OT-4 и IT-7M.

9. Проведена проверка достоверности полученных результатов, состоявшая в оценке сходимости алгоритма, сравнении с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов и сопоставлении с данными эксперимента.

Содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Андриченко А.Г., Малинин Н.Н. Пластическая неустойчивость ортотропных оболочек вращения. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1976, № 3, с.172-175.
2. Андриченко А.Г. Пластическая неустойчивость ортотропных цилиндрических оболочек. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1977, № 6, с.24-27.
3. Андриченко А.Г., Ширшов А.А. Методика построения диаграмм деформирования ортотропного материала. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1982, № 9, с. 18-20.
4. Андриченко А.Г. Большие деформации тонкостенных оболочек вращения. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1983, № 6, с. 11-13.

