

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ ТРУБЫ

©2011 Р. И. Непершин

Московский государственный технологический университет «Станкин»

Рассмотрено пластическое формообразование кольцевых складок потери устойчивости при осевом сжатии тонкостенных труб. Начальная стадия образования складки рассчитывается по мембранной модели жесткопластической оболочки с условием пластичности Мизеса и упрочнением. Конечная стадия рассчитывается по идеально пластической моментной модели. Расчеты удовлетворительно согласуются с экспериментами.

Осевое сжатие тонкостенной трубы, пластическая потеря устойчивости, кольцевые складки, жесткопластическая мембрана, идеально пластический изгиб, условие Мизеса, упрочнение.

В [1] приведены первые экспериментальные данные о пластической потере устойчивости при осевом сжатии тонкостенных металлических труб в виде образования симметричных и несимметричных складок. Расчетные модели для треугольных, квадратных и кольцевых складок по теории пластического шарнира приведены в [2,3]. Экспериментальные исследования пластической потери устойчивости тонкостенных труб из алюминиевых сплавов приведены в [4,5].

Пластическое формообразование кольцевых складок при потере устойчивости трубы можно использовать для получения утолщений с криволинейным профилем. Работа пластического формоизменения при осевом сжатии тонкостенных труб может также использоваться в защитных конструкциях энергетических установок и транспортных машин для гашения кинетической энергии при аварийных нагрузках.

Вследствие сложности локальной пластической потери устойчивости с образованием различных форм складок эта важная задача до настоящего времени не получила развития.

Длина волны L при локальной потере устойчивости упругой цилиндрической оболочки с толщиной стенки h , радиусом средней поверхности R , модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν определяется формулой [1]

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{R^2 h^2}{12(1-\nu^2)}}. \quad (1)$$

Длины волн пластических кольцевых складок, полученные в экспериментах [4,5], удовлетворительно согласуются с формулой

(1). Это позволяет предположить, что пластическому образованию складок предшествует искривление стенки на стадии упругой нагрузки трубы. Аналогичный экспериментальный факт совпадения длины упругой волны с длиной волны складки при осевом пластическом сжатии тонкостенной трубы с квадратной формой поперечного сечения получен в [6].

В представленной работе рассматривается пластическое формоизменение металлических труб при осевом сжатии с относительно толстой стенкой, для которых преобладает осесимметричная форма локальной потери устойчивости в виде кольцевых складок с длиной волны, определяемой формулой (1). Для стальных труб критическое напряжение упругой потери устойчивости значительно превышает напряжение текучести [1], поэтому локальной потере устойчивости предшествует однородная пластическая деформация осевого сжатия, которая вследствие упрочнения материала существенно повышает критическое напряжение при пластической потере устойчивости.

Начальная стадия образования кольцевой складки происходит при больших осевых напряжениях сжатия с малой кривизной образующей и моделируется уравнениями мембранной теории жесткопластической оболочки.

Конечная стадия образования складки моделируется уравнениями идеально пластического изгиба с конечной кривизной криволинейных участков с учетом окружных напряжений и деформаций.

Представленная модель позволяет более точно оценивать работу пластического

формоизменения кольцевых складок при осевом сжатии труб по сравнению с [4,5], что имеет важное практическое значение при конструировании демпфирующих защитных устройств машин при аварийных нагрузках.

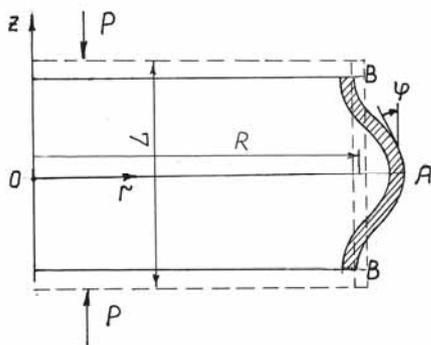


Рис. 1. Симметричная кольцевая складка в цилиндрических координатах

На рис. 1 показана симметричная кольцевая складка в цилиндрических координатах r, z, θ с длиной волны L , начальным радиусом срединной поверхности R_0 и толщиной стенки h_0 на начальной стадии потери устойчивости. Эта форма возникает после пластической деформации e_0 однородного осевого сжатия трубы.

Упрочнение материала задается степенной зависимостью напряжения текучести σ_s от пластической деформации e_p :

$$\sigma_s = \sigma_0 (1 + C e_p^n) \quad (2)$$

с параметрами материала C, n и σ_0 . Перед потерей устойчивости происходит пластическая деформация сжатия трубы с увеличением начального радиуса срединной поверхности и толщины стенки при уменьшении высоты трубы от H_0 до H :

$$R = R_0 (1 + 0.5 e_p), \quad h = h_0 (1 + 0.5 e_p), \quad (3)$$

$$e_p = \ln(H_0/H), \quad 0 \leq e_p \leq e_0.$$

Сила однородного сжатия трубы определяется формулой

$$P = 2\pi \sigma_s R_0 h_0 (1 + 0.5 e_p)^2. \quad (4)$$

При потере устойчивости на длине L происходит искривление образующей срединной поверхности. При осевом сжатии трубы материальный элемент срединной поверхности находится в плоском напряженном состоянии с отрицательным меридиональным σ_φ и окружным σ_θ напряжениями,

которые удовлетворяют условию пластичности Мизеса:

$$\sigma_\theta^2 + \sigma_\varphi^2 + \sigma_\theta \sigma_\varphi = \sigma_s^2. \quad (5)$$

Уравнение равновесия криволинейного элемента срединной поверхности по направлению нормали имеет вид

$$\chi \sigma_\varphi + \sigma_\theta \cos \varphi / r = 0, \quad (6)$$

где χ – кривизна образующей срединной поверхности в меридиональном сечении и φ – угол наклона касательной к образующей с осью z . Исключая σ_θ из (5) и (6), получим соотношение для σ_φ и χ

$$\sigma_\varphi \sqrt{(a^2 - a + 1)} = \sigma_s. \quad (7)$$

$$\text{отсюда } a = \chi r / \cos \varphi. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение равновесия в направлении касательной к образующей срединной поверхности с учетом изменения толщины стенки h имеет вид

$$d\sigma_\varphi = -(\sigma_\theta + \sigma_\varphi) \frac{dr}{r} - \sigma_\varphi \frac{dh}{h}. \quad (9)$$

Исключение σ_θ с помощью уравнений (6) и (8) приводит уравнение (9) к виду

$$d\sigma_\varphi = -\sigma_\varphi \left[(1-a) \frac{dr}{r} + \frac{dh}{h} \right]. \quad (10)$$

Приращение пластической деформации de_h по толщине связано с приращениями de_φ и de_θ условием несжимаемости и ассоциированным законом пластического течения:

$$de_h = -(1+b) de_\theta, \quad de_\varphi = b de_\theta, \quad (11)$$

$$b = (2-a) / (1-2a).$$

Напряжение σ_φ связано с коэффициентом a и σ_s уравнением (7), в котором σ_s определяется формулой (2) в зависимости от накопленной деформации e_p . Величина e_p с учетом начальной деформации e_0 определяется приращениями деформаций de_h, de_φ и de_θ по формуле

$$e_p = e_0 + (2/\sqrt{3}) \int \sqrt{1+b+b^2} |de_\theta|, \quad (12)$$

где $de_\theta = \Delta r/r$ – приращение окружной деформации.

Пластическая потеря устойчивости происходит при малом искривлении средин-

ной поверхности с длиной волны L , определяемой формулой (1). Радиус R при потере устойчивости определяется первым соотношением (3) в зависимости от начальной деформации e_0 . При заданных значениях e_0 и L сила P^* при потере устойчивости определяется формулой

$$P^* = 2\pi \sigma_s (R - \Delta) h, \quad (13)$$

где σ_s определяется для суммарной пластической деформации $e_p^* = e_0 + (2/\sqrt{3})\Delta/R$. Приравнявая величину P^* силе однородного пластического сжатия (4) до деформации e_0 с использованием уравнений (2) и (3) получаем зависимость между Δ/R_0 и e_0 :

$$\frac{\Delta}{R_0} = \frac{e_*^n - e_0^n}{e_*^n + 1/C}, e_* = e_0 + (2/\sqrt{3})\frac{\Delta}{R_0}. \quad (14)$$

Для тонкостенных труб с большим отношением R_0/h_0 деформация $e_0 \rightarrow 0$ и $\Delta \rightarrow 0$. Для толстостенных труб деформацию e_0 можно найти из (14) при заданном значении Δ . Для идеально пластического материала потеря устойчивости происходит при $e_0 = 0$ и $\Delta = 0$. Для упрочняющегося материала потеря устойчивости может происходить при $e_0 > 0$ и зависит от параметров материала C и n .

На начальной стадии после потери устойчивости кривизна образующей срединной поверхности мала. Форма складки определяется интегрированием дифференциального уравнения (10), правая часть которого зависит от кривизны χ , определяемой формулами (7) и (8). При решении уравнения (10) определяется кривизна χ и находится форма образующей срединной поверхности интегрированием дифференциальных соотношений

$$d\varphi = \chi dl, dr = dl \sin \varphi, dz = dl \cos \varphi, \quad (15)$$

где dl – длина элемента дуги образующей, которая изменяется вследствие деформации de_φ по второму соотношению (11) в зависимости от de_θ .

Интегрирование уравнения (10) выполняется численным методом Рунге-Кутты от точки A к точке B (рис. 1) с использованием переменной l_0 – начальной длины прямолинейной образующей срединной поверхности с радиусом R , определяемым для начальной деформации e_0 .

Точка A задается координатами $l_0 = 0$, $z = 0$, $r = R + \Delta_A$ при $\varphi = 0$ по условию симметрии складки. В точке A задается начальное значение кривизны χ_A , определяющее коэффициент a по формуле (8), затем определяются деформации по формулам (11) и (12), напряжение текучести по формуле (2) и напряжения σ_φ и σ_θ по формулам (7) и (6). Данные в точке A являются начальными условиями для численного интегрирования уравнения (10) с шагом dl_0 по координате $0 < l_0 < L/2$.

На первом шаге процедуры Рунге-Кутты по значениям r и a в точке A по формулам (11) вычисляются толщина h и длина dl , а затем интегрированием уравнений (15) определяется угол φ и координаты r, z узловой точки, находящейся на расстоянии dl по образующей от точки A . В результате определяется первое приближение для правой части уравнения (10) и напряжение σ_φ в соседней узловой точке. Затем из уравнений (7) и (8) вычисляются значения a и χ в соседней узловой точке, которые используются для уточненного вычисления правой части уравнения (10) на втором шаге процедуры Рунге-Кутты. Циклическое повторение описанной процедуры с использованием данных в найденной узловой точке в качестве начальных условий для уравнения (10) определяет криволинейную образующую срединной поверхности складки и распределения переменных $\sigma_\varphi, \sigma_\theta, \sigma_s, \chi, \varphi, h, r, z$ в зависимости от начальной координаты l_0 .

Точка B определяется координатой $l_0 = L/2$. Форма образующей складки представляет выпукло-вогнутую кривую с изменением знака кривизны χ и напряжения σ_θ при $r < R$. По условию симметрии в точке B должно выполняться равенство $\varphi = 0$, которое используется для корректировки кривизны χ_A в точке A в исходных данных вычислительной программы. Осевое перемещение s , соответствующее образованию одной складки с амплитудой радиального смещения Δ_A точки A , равно $L - 2z_B$. Соответствующее значение осевой силы сжатия определяется формулами

$$P(s) = 2\pi \sigma_{\varphi A} r_A h_A = 2\pi \sigma_{\varphi B} r_B h_B. \quad (16)$$

С увеличением радиального смещения Δ_A точки A и перемещения s быстро увеличиваются кривизны χ_A и χ_B в точках A и B с

уменьшением кривизны около точки перегиба и силы P . Поэтому на конечной стадии образования складки в зоне перегиба при $\chi \rightarrow 0$ происходит разгрузка материала при статически допустимом напряженном состоянии $\sigma_s > |\sigma_\phi| > 0$ и $\sigma_\theta = 0$, при котором тождественно выполняется уравнение равновесия (6).

Конечная стадия образования складки описывается моделью идеально пластического изгиба, показанной на рис. 2.

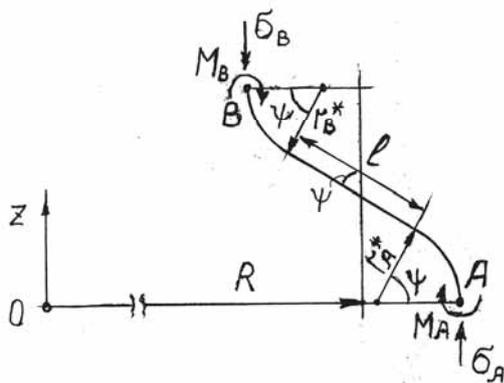


Рис. 2. Модель идеально пластического изгиба

Радиусы кривизны $r_A^* = 1/\chi_A$ и $r_B^* = 1/\chi_B$ круговых участков в точках A и B определяются с учетом нормальных напряжений σ_A, σ_B . Круговые участки складки соединены жестким линейным отрезком длиной l с углом наклона $\psi = -\phi$ к оси z . На круговых участках учитывается окружная деформация e_θ , приводящая к изменению толщины, для среднего значения χ между начальной и конечной формами складки:

$$\begin{aligned} h_A &= h \left(1 + \frac{1 + 0.5a_A}{1 - a_A} \ln \frac{r_A}{R} \right), \\ h_B &= h \left(1 + \frac{1 + 0.5a_B}{1 - a_B} \ln \frac{r_B}{R} \right), \\ a_A &= -\frac{r_A}{r_A^*}, \quad a_B = \frac{r_B}{r_B^*}. \end{aligned} \quad (17)$$

Нормальные напряжения σ_A и σ_B удовлетворяют условию пластичности (5) и уравнению равновесия (6) при $\phi = 0$. Исключая напряжение σ_θ из этих уравнений, находим радиусы кривизны r_A^* и r_B^* :

$$\begin{aligned} r_A^* &= \frac{2r_A\sigma_A}{-\sigma_A + \sqrt{4\sigma_s^2 - 3\sigma_A^2}}, \\ r_B^* &= \frac{2r_B\sigma_B}{-\sigma_B + \sqrt{4\sigma_s^2 - 3\sigma_B^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Напряжения σ_A и σ_B связаны условием равновесия нормальных сил:

$$\sigma_A r_A h_A = \sigma_B r_B h_B. \quad (19)$$

На конечной стадии образования складки возникают большие пластические деформации, при которых производная $d\sigma_s/de_p$ мала, поэтому на этой стадии применяем модель идеально пластического тела. Моменты пластического изгиба с учетом нормальных сил в точках A и B при использовании σ_s в качестве характерного напряжения определяются формулами

$$M_A = \frac{h_A^2}{4} (1 - \sigma_A^2), \quad M_B = \frac{h_B^2}{4} (1 - \sigma_B^2). \quad (20)$$

Моменты, приведенные к точке A , удовлетворяют уравнению равновесия

$$M_A r_A + M_B r_B = \sigma_B r_B h_B (r_A - r_B). \quad (21)$$

Уравнения (19) – (21) приводятся к квадратному уравнению относительно напряжения σ_B , из которого находим

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{-b + \sqrt{b^2 + ac}}{a}, \quad a = 1 + \frac{r_B}{r_A}, \\ b &= 2 \frac{r_A}{r_B} \frac{(r_A - r_B)}{h_B}, \quad c = 1 + \frac{r_A h_A^2}{r_B h_B^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Условия сохранения длины образующей срединной поверхности и объема кольцевой складки приводят к уравнениям

$$l + (r_A^* + r_B^*) \psi = L/2, \quad (23)$$

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = hRL/2, \quad (24)$$

$$\xi_1 = [h_B r_B^* (r_B + r_B^*) + h_A r_A^* (r_A - r_A^*)] \psi,$$

$$\xi_2 = [h_A (r_A^*)^2 - h_B (r_B^*)^2] \sin \psi,$$

$$\xi_3 = \frac{1}{4} l (h_A + h_B) [r_A + r_B - (r_A^* - r_B^*) (1 - \cos \psi)].$$

Переменные r_A^*, r_B^*, l и ψ связаны с радиусами r_A и r_B точек A и B в цилиндрических координатах уравнением

$$l \sin \psi + (r_A^* + r_B^*) (1 - \cos \psi) = r_A - r_B. \quad (25)$$

Перемещение s , соответствующее образованию одной складки, определяется формулой

$$s = L - 2[(r_A^* + r_B^*) \sin \psi + l \cos \psi]. \quad (26)$$

При заданном перемещении s получаем нелинейную систему уравнений (17) – (26) для неизвестных $h_A, h_B, r_A, r_B, r_A^*, r_B^*, \sigma_A, \sigma_B, l$,

ψ . Эту систему решаем методом простых итераций с использованием начальных значений h_A, h_B, r_A^*, r_B^* и ψ , известных после расчета начальной стадии образования складки по мембранной теории. Угол ψ используется в качестве независимой переменной. На первой итерации из уравнения (23) определяется l по начальным значениям r_A^* и r_B^* . Затем решается линейная система (24), (25) относительно переменных r_A и r_B с использованием начальных значений h_A и h_B . По уравнениям (22) и (19) определяются напряжения σ_B и σ_A , и по уравнениям (18) и (17) находят новые приближения для r_A^*, r_B^*, h_A и h_B . Практически достаточная точность решения системы при малом приращении угла $\delta\psi$ получается за одну-две итерации. После завершения итераций при заданном угле ψ по формулам (26) и (16) определяется зависимость $P(s)$ при увеличении угла ψ .

Ниже приведен пример расчета формообразования симметричной складки при осевом сжатии тонкостенной трубы из стали 10 с начальным диаметром 50 мм и толщиной стенки 1 мм. Аппроксимацией экспериментальной кривой упрочнения зависимостью (2) получены значения параметров $\sigma_0=280 \text{ Н/мм}^2, C = 2.8, n = 0.75$. По формуле (1) при $\nu = 0.3$ находим длину волны $L=17.3 \text{ мм}$. Начальная пластическая деформация e_0 при $\Delta = 0.01 \text{ мм}$ по уравнению (14) равна 0.05. Критическая сила потери устойчивости P^* , рассчитанная по уравнению (13), равна 57.26 кН.

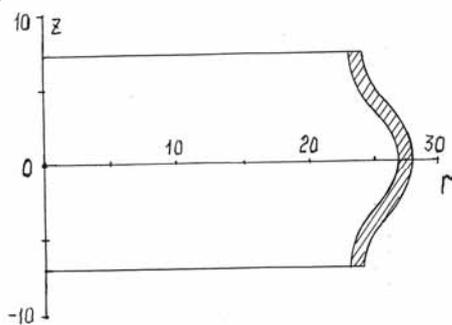


Рис. 3. Форма складки, найденная интегрированием уравнений

На рис. 3 показана форма складки, найденная интегрированием уравнений (10) и (15) для радиального смещения $\Delta_A = 1.8 \text{ мм}$. Расчетные значения перемещения s и силы P равны 3.27 мм и 10.77 кН. С увеличением s

происходит быстрое снижение силы P и увеличение кривизны складки в точках A и B .

На рис. 4 показаны формы складки для $\psi = 1$ (а), $\psi = 1.6$ (б) и $\psi = 2$ (с), рассчитанные с использованием начальных данных r_A^*, r_B^*, h_A и h_B при $\psi = 0.8$ для складки, показанной на рис. 3. В отличие от модели идеально пластического шарнира [3] расчет конечной стадии формоизменения складки по настоящей модели показывает увеличение кривизны до конечных значений в точках A и B при контакте по внутренней границе складки в конце процесса. Эта форма качественно согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работах [1,4,5].

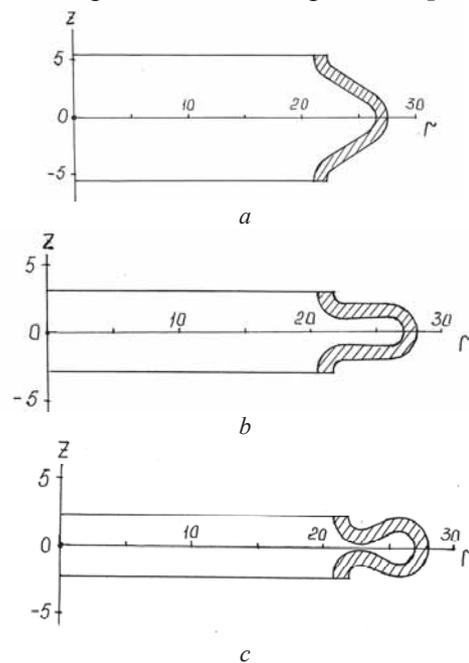


Рис. 4. Формы складки для $\psi = 1$ (а), $\psi = 1.6$ (б) и $\psi = 2$ (с)

На рис. 5 показана зависимость осевой силы сжатия P , кН от перемещения s , мм при образовании одной складки, включая упругий участок OA до начала пластической деформации в точке A .

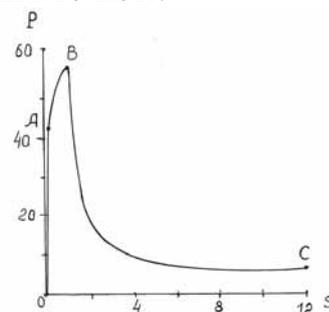


Рис. 5. Зависимость осевой силы сжатия P , кН от перемещения s , мм

На участке AB происходит однородная пластическая деформация до $e_0 = 0.05$ с увеличением силы P до критического значения 57.26 кН в точке B . На участке BC происходит образование кольцевой складки до ее смыкания в точке C . Этот участок имеет круто падающую часть при малых перемещениях s после критической точки B , на которой образуется складка, рассчитываемая по мембранной теории, и пологую часть при больших перемещениях s , на которой форма складки рассчитывается по модели идеально пластического изгиба. Эта модель показывает пологий минимум силы P в окрестности угла $\psi = \pi/2$, после которого происходит быстрое смыкание складки. При отсутствии упрочнения (идеально пластическая модель) и при $e_0 \rightarrow 0$ (тонкостенная труба большого диаметра) участок AB стя-

гивается к точке A и работа пластического формообразования складки сильно снижается. Расчеты работы формообразования кольцевых складок по модели идеально пластического шарнира [3] приводят к заниженным оценкам по сравнению с экспериментальными данными [5].

Проведены эксперименты по осевому сжатию трубы из стали 3 на гидравлической испытательной машине с записью графика $P(s)$ при пластической потере устойчивости с образованием кольцевых складок. Кривая упрочнения материала получена осадкой кольцевых образцов между шлифованными плитами со смазкой суспензией машинного масла с графитом. Кривая упрочнения аппроксимирована зависимостью (2) с параметрами $\sigma_0 = 320$ Н/мм², $C = 2.25$, $n = 0.41$.

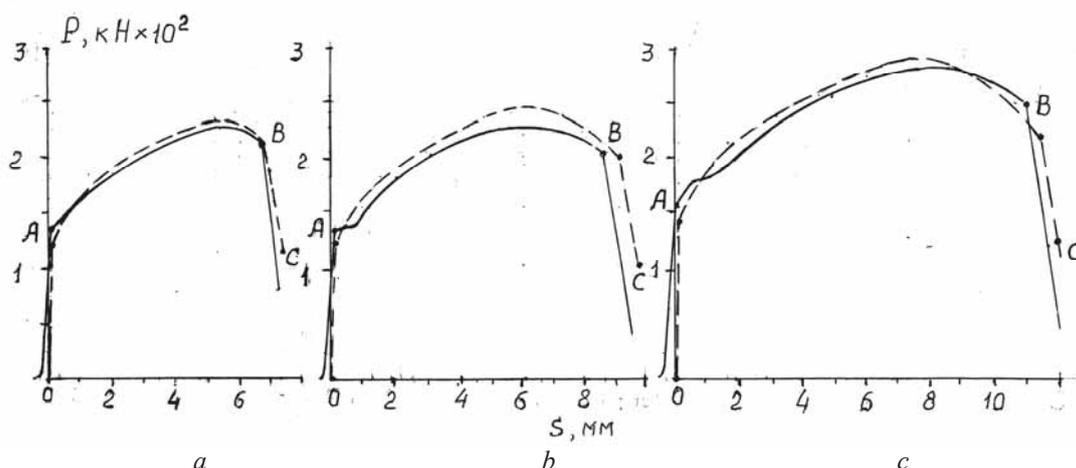


Рис. 6. Экспериментальные зависимости

На рис. 6 сплошными линиями показаны экспериментальные зависимости $P(s)$ при потере устойчивости образцов с начальными размерами D_0, h_0, H_0 : 42, 3.2, 74 мм (а); 41.5, 3.25, 71.4мм (b) и 42, 3.75, 75 мм (с). На образцах (b) и (с) наблюдается площадка текучести, смещающая кривую нагрузки по оси s . От точки A до точки максимума кривой $P(s)$ происходит однородная пластическая деформация $e_0 = 0.07, 0.095$ и 0.098 для образцов (а), (b) и (с) соответственно. Максимальные силы соответствуют формуле (4). После точки максимума происходит потеря устойчивости образцов в виде двух плавно сопряженных складок.

Расчетные зависимости показаны на рис. 6 штриховыми линиями. На участке однородной пластической деформации образ-

цов до e_0 зависимости $P(s)$ рассчитаны по формуле (4). Силы в точках B и C расчетной зависимости $P(s)$ получены моделированием складок с минимальной и максимальной амплитудами радиального смещения точки A (см. рис. 1).

При пластическом сжатии образцов с размерами $D_0 = 40$ мм, $H_0 = 70$ мм при $h_0 = 1$ и 2 мм наблюдали образование трех треугольных и квадратных складок соответственно. Деформации однородного сжатия для этих образцов перед потерей устойчивости равны 0.017 и 0.033 соответственно. Эксперименты показывают увеличение критической силы пластической потери устойчивости с увеличением толщины стенки за счет увеличения e_0 и упрочнения материала образца.

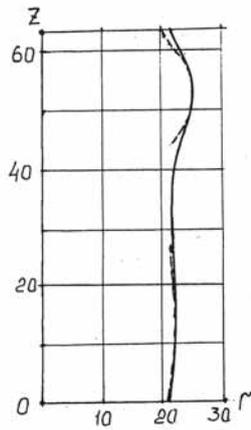


Рис. 7. Средние профили

После разгрузки образцов измеряли профиль наружной поверхности с точностью 0.01 мм. Измерения показали эксцентricность профилей ~ 0.1 мм относительно оси образцов. На рис. 7 сплошными линиями показаны средние профили $r(z)$, мм для образца (b) в виде двух сопряженных складок с различной амплитудой.

Амплитуды экспериментальных профилей и приведенные выше начальные деформации e_0 использовали для расчета профилей симметричных складок на начальной стадии потери устойчивости. Длина волны, рассчитанная по уравнению (1), равна 28 мм. Расчетные профили симметричных складок с заданными значениями амплитуды показаны на рис. 7 штриховыми линиями.

Для складки с малой амплитудой расчетные профили практически совпадают с экспериментом. Для складки с большой амплитудой расчетные профили отклоняются от эксперимента около контакта с подвижной плитой и в зоне сопряжения с нижней частью профиля. Длина волны L хорошо согласуется с экспериментом для складки с малой амплитудой. Отклонения расчетного профиля складки с большой амплитудой от экспериментального можно объяснить влиянием контактного трения, неkratностью высоты образца длине волны L и отсутствием симметрии профиля при сопряжении складок с различной амплитудой.

Эксперименты показывают удовлетворительное соответствие с расчетной моделью начальной стадии пластической потери устойчивости трубы с образованием кольцевых складок по зависимости $P(s)$ с учетом

упрочнения материала и начальной пластической деформации e_0 .

Так как сила P для складки с малой амплитудой значительно больше силы для складки с большой амплитудой (точки B и C на рис.6), то деформирование складки с большой амплитудой продолжается с падением силы P без деформирования складки с малой амплитудой вплоть до смыкания складки с большой амплитудой. При дальнейшем сжатии трубы происходит увеличение силы P до значения, соответствующего складке с малой амплитудой и меньшего по сравнению с начальной силой потери устойчивости.

При стационарном складкообразовании достаточно длинной трубы устанавливаются постоянные формы конечной и начальной складок, проводящие к периодическим зависимостям силы от перемещения, наблюдаемым в экспериментах [1,4,5].

Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем [Текст] / С.П. Тимошенко М.: Гостехиздат. 1946. -532 с.
2. Timoshenko, S. Theory of Elastic Stability / S. Timoshenko McGraw-Hill, New York, 1934.
3. Pugsley, A. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns / A. Pugsley, M. Macaulay // Quart. Journal Mech. and Applied Math. 1960. V. XIII. Pt.1. pp. 1–9.
4. Alexander, J.M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading / J.M. Alexander // Quart. Journal Mech. and Applied Math. 1960. V. XIII. Pt.1. pp. 10–15.
5. Andrews, K.R.F. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading / K.R.F. Andrews, G.L. England, E. Ghani // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 687–696.
6. Mamalis, A.G. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression / A.G. Mamalis, W. Johnson // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 713 – 732.
7. Meng, Q. Axial crushing of square tubes / Q. Meng, S.T.S. Al-Hassani, P.D. Soden // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 747 – 773.

PLASTIC BUCKLING OF AXIALLY COMPRESSED TUBE

©2011 R. I. Nepershin

Moscow State Technological University “Stankin”

Plastic forming of circular buckling folds is considered for axially compressed tube. Initial stage of the buckling fold forming is calculated using membrane rigid-plastic shell model with Mises yield criterion and plastic work hardening effect. Final stage of the buckling fold forming is calculated using ideal plastic bend model. Models predictions are reasonable correlated with experimental data.

Thin-walled tube axial compression, plastic buckling, circular folds, rigid-plastic membrane, ideal plastic bending, Mises yield criterion, work hardening.

Информация об авторах

Непершин Ростислав Иванович, доктор технических наук, профессор Московского государственного технологического университета «Станкин». Тел.: (495) 654-39-61, 8-926-899-65-25. E-mail: nepershin_ri@rambler.ru. Область научных интересов: прикладные задачи теории пластичности.

Nepershin Rostislav Ivanovich, doctor of technical sciences, the professor of Moscow State Technological University “Stankin”. Phone: (495) 654-39-61, 8-926-899-65-25. E-mail: nepershin_ri@rambler.ru. Area of research: applied problems of plasticity theory.