

## УЧЕТ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗОНЫ ВОЗМОЖНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НА ПЕРВОЙ ОПЕРАЦИИ РАЗДАЧИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

*Путем теоретического анализа установлена возможная граница потери устойчивости заготовки при раздаче коническими пуансонами цилиндрической заготовки. Для анализа использовали инженерный метод определения напряженного состояния в очаге деформации, а также методы теории цилиндрических оболочек для определения перемещений. Полученные зависимости могут быть использованы для проектирования технологических процессов деформирования трубных заготовок.*

*Ключевые слова: цилиндрическая заготовка, устойчивость, напряжения, изгибающий момент, деформация.*

Р.Г. ПУЗИР, Л.Е. ДИКА

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

## ВРАХУВАННЯ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЗОНИ МОЖЛИВОЇ КІЛЬЦЕВОЇ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ НА ПЕРШІЙ ОПЕРАЦІЇ РОЗДАЧІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ОБІДІЯ КОЛІС

*Теоретичним аналізом встановлена можлива межа втрати стійкості заготовки при роздачі конічними пуансонами циліндричної заготовки. Для аналізу використовували інженерний метод визначення напруженого стану в осередку деформації і теоретичні методи теорії циліндричних оболонок. Отримані залежності можуть бути використані для проектування технологічних процесів деформування трубних заготовок.*

*Ключові слова: циліндрична заготовка, стійкість, напруження, згинальний момент, деформація.*

R.G. PUZYR, L.E. DIKAYA

Kremenchug national university by Mihail Ostrogradskiy

## ACCOUNT OF WORK-HARDENING OF METAL AT DETERMINATION OF AREA OF POSSIBLE CIRCULAR LOSS OF STABILITY ON THE FIRST OPERATION OF DISTRIBUTION AT MAKING RIMES OF WHEELS

*The possibility of a theoretical analysis of the boundary of instability in the distribution of blank conical punch cylindrical billet. Used for the analysis of the engineering method of determining the stress state in the deformation and theoretical methods of the cylindrical shells. The dependences obtained can be used for the design process of deformation of billets.*

*Keywords: cylindrical billet, stability, stress, bending moment, deformation.*

### Постановка проблемы

Процесс радиально-ротационного профилирования считается высокопроизводительным технологическим методом производства ободьев колес транспортных средств из стальных листовых заготовок. Для интенсификации этого процесса и уменьшения зон локализации деформаций перед профилированием применяют операцию раздачи цилиндрической заготовки коническими пуансонами с двух сторон.

### Анализ последних исследований и публикаций

Обзор литературных источников, патентной информации показал, что процессу раздачи, изучению напряженно-деформированного состояния, условий потери устойчивости заготовки от различных показателей деформирования посвящено большое количество работ [1, 2, 3, 4], что свидетельствует о достаточной изученности вопроса. Критическая степень деформации при раздаче регламентируется двумя видами потери устойчивости – возникновением складки на некотором расстоянии от зоны передачи усилия и появлением шейки в одном или сразу в нескольких участках кромки деформируемой части заготовки с дальнейшим возникновением трещины.

Максимальное меридиональное напряжение без учета утонения и упрочнения материала, действующее в стенках недеформированной части заготовки [3], равно:

$$\sigma_{\rho \max} = -\sigma_s \left[ \left( 1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left( \frac{R_u}{r_3} - 1 \right) + \sqrt{\frac{2s}{R_u}} \sin \alpha \right] (3 - 2 \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  
 $R_u$  – радиус свободного изгиба;  
 $r_3$  – радиус заготовки;  
 $s$  – толщина стенки заготовки.

Из зависимости (1) следует, что с увеличением угла конуса пуансона, толщины заготовки и коэффициента раздачи сжимающие напряжения увеличиваются.

#### Формулирование цели исследования

Целью исследований является определение размеров зоны начала складкообразования при раздаче коническим пуансоном с целью формирования рекомендаций для устойчивого деформирования цилиндрических заготовок.

Зависимость (1) определяет распределение меридиональных напряжений в стенке цилиндрической заготовки на выходе из очага деформации и в стенках недеформированной части заготовки. Т.е. сжимающие напряжения по длине недеформированной части заготовки всюду равны и способны вызвать потерю устойчивости в любой ее части. Но, на самом деле, складкообразование происходит вблизи зоны передачи усилия, что подтверждают исследования [1, 2, 3]. Это может объясняться воздействием не только меридиональных напряжений, но и другого силового фактора – изгибающего момента, который при деформировании цилиндрических заготовок носит колебательный затухающий характер.

#### Изложение основного материала исследования

Дифференциальное уравнение равновесия элемента заготовки при осесимметричной деформации было получено А.А. Ильюшиным [5]:

$$\frac{d^4 \bar{w}}{dx^4} + 4\bar{w} = \bar{p} + \lambda \delta t + \lambda \frac{d^2 \delta m}{dx^2}, \quad (2)$$

где  $\bar{w} = \frac{w}{ae_s}$ ;

$w$  – радиальное перемещение элемента оболочки;  
 $\delta t$  – вариация безразмерного усилия;  
 $\delta m$  – вариация безразмерного момента в меридиональном направлении.

Приближенным решением данного уравнения [2] можно назвать такое, при котором вариации сил и моментов тождественно равны нулю  $\delta t = 0$ ,  $\delta m = 0$  и отсутствует поверхностная нагрузка, так как участок свободного изгиба не соприкасается с инструментом, тогда получаем следующее уравнение:

$$w' = e^{-\beta x} (A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x), \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные, определяемые по граничным условиям при  $\beta = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2ah}}$ .

Для определения напряжений, действующих в очаге деформации, воспользуемся уравнениями равновесия в цилиндрических координатах [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} r + \tau_{xr} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} r + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} r + (\sigma_r - \sigma_\theta) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решаем совместно данную систему с условием пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = \sigma_s, \quad (5)$$

при этом учитываем:

$\sigma_r = 0$  ввиду малости, по сравнению с другими напряжениями,

$\tau_{xr}$  не зависит от координаты  $r$ , но зависит от толщины стенки линейно:  $\tau_{rx} = \frac{\tau_k x}{s}$ ,

тогда  $\frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} = \frac{\tau_k}{s}$  и  $\tau_k = \frac{\sigma_\theta s}{r}$ ;  $\tau_{rx} = \frac{\sigma_\theta x}{r}$ , получим следующее уравнение равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} r + \frac{\sigma_\theta x}{r} = 0. \quad (6)$$

Производя интегрирование и учитывая граничные условия при  $x = 0, \sigma_x = 0$  находим

$$\sigma_x = -\sigma_s \frac{x^2}{r^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma_x$  - напряжения, действующие по оси заготовки;

$r$  - радиус заготовки,

тогда из условия пластичности (5)

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left( 1 - \frac{x^2}{r^2} \right). \quad (8)$$

Найдем прогиб в зоне свободного изгиба в направлении радиуса заготовки, который появляется при действии выше полученных напряжений. Известно [5], что тангенциальная деформация равна  $\varepsilon_\theta = \frac{w}{R}$ , где  $w$  - прогиб заготовки в направлении радиуса. Из связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности при плоском напряженном состоянии:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varepsilon_i}{2\sigma_i} (2\sigma_\theta - \sigma_\rho), \quad (9)$$

Подставляя в данное уравнение значения напряжений из (7) и (8), перейдем к следующему выражению для прогиба:

$$w = \frac{r\sigma_s}{E} \left( 1 - \frac{3x^2}{2r^2} \right). \quad (10)$$

**Результаты исследований.** Полное выражение для прогиба с учетом краевого эффекта для оболочек будет иметь вид [6]

$$w = \frac{r\sigma_s}{E} \left( 1 - \frac{3x^2}{2r^2} \right) + e^{-\beta x} (A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x). \quad (11)$$

Производя несложные преобразования и определив постоянные из граничного условия  $x = l + a, w = 0, \frac{dw}{dx} = 0$  (рис. 1), а также, учитывая упрочнение материала в процессе деформирования в

виде линейной аппроксимации кривой упрочнения второго рода  $\sigma_s = \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{R_3} \right)$ , окончательно получим:

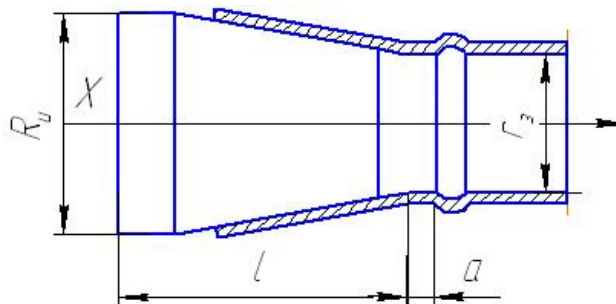


Рис. 1. Потеря устойчивости при раздаче

$$w = \frac{r \left( \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{R_3} \right) \right)}{E} \left( 1 - \frac{3x^2}{2r^2} \right) + e^{\beta(l+a-x)} \left( \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{R_3} \right) \right) \left( - \left( \frac{3(l+a)}{\beta E r} + \frac{r}{E} \left( 1 - \frac{3(l+a)^2}{2r^2} \right) \right) \sin \beta(l+a-x) - \left( \frac{r}{E} \left( 1 - \frac{3(l+a)^2}{r^2} \right) \cos \beta(l+a-x) \right) \right). \quad (12)$$

Найдем расстояние  $a$  от участка свободного изгиба, где может при определенных условиях начаться потеря устойчивости заготовки при раздаче в виде кольцевой складки. При  $x=l$  и, вследствие малости расстояния  $a$  по сравнению с  $l$ , в формуле (12) слагаемое содержащее синус будет стремиться к нулю, а слагаемое, содержащее косинус к единице, тогда:

$$w = \frac{r \left( \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{r} \right) \right)}{E} \left( 1 - \frac{3l^2}{2r^2} \right) + e^{\beta a} \left( - \frac{r \left( \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{r} \right) \right)}{E} \left( 1 - \frac{3l^2}{r^2} \right) \right), \quad (13)$$

отсюда, учитывая, что  $\varepsilon_\theta = \frac{R-r}{r} = \frac{w}{r}$  найдем

$$a = \ln \frac{1}{\beta} \left( \frac{(R-r)E}{r \left( \sigma_{T0} + \Pi \left( 1 - \frac{\rho}{r} \right) \right) \left( 1 - \frac{3l^2}{2r^2} \right)} - 1 \right). \quad (14)$$

Из полученной зависимости следует, что упрочнение материала будет сдвигать границу образования складки к зоне свободного изгиба.

Для примера рассчитаем параметр  $a$  для таких начальных условий, при этом определим среднее значение напряжения текучести для очага деформации:  $R_u = 80$  мм;  $r_3 = 55$  мм;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $h = 3$  мм;  $\sigma_\theta = 38$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\delta_{10} = 30\%$ ,

$$\begin{aligned} \sigma_{T0} &= \sigma_\theta (1 - 2\psi_\theta) / (1 - \psi_\theta)^2, \\ \psi_\theta &= \varepsilon_\theta / (1 - \varepsilon_\theta), \\ \varepsilon_\theta &= 0,8\delta_{10}, \\ \Pi &= \sigma_\theta / (1 - \psi_\theta)^2. \end{aligned}$$

Для стали 08кп имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= 0,8 \cdot 0,3 = 0,24, \\ \psi_\theta &= 0,24 / 1,24 = 0,194, \\ \Pi &= 380 / (1 - 0,194)^2 = 39,5 \text{ кгс/мм}^2, \\ \sigma_{m0} &= 380 \cdot (1 - 2 \cdot 0,194) / (1 - 0,194)^2 = 35,8 \text{ кгс/мм}^2, \\ \sigma_s &= 35,8 + \frac{39,5}{2} \left( \frac{80}{55} - 1 \right) = 44,77 \text{ кгс/мм}^2, \text{ тогда} \end{aligned}$$

$$a = \ln \frac{\sqrt{2 \cdot 55 \cdot 3}}{\sqrt{3}} \left( \frac{25 \cdot 21000}{55 \cdot 44,77 \left( 1 - \frac{43^2}{55^2} \right)} - 1 \right) \approx 8,6 \text{ мм.}$$

### **Выводы**

Путем теоретического анализа процесса раздачи цилиндрической заготовки при принятых допущениях установлена граница начала потери устойчивости с образованием окружной складки. Образование складки происходит на некотором расстоянии от зоны свободного изгиба заготовки, которое зависит от размеров заготовки  $\beta$ , характерных для теории оболочек, предела текучести и упругости материала, степени упрочнения и коэффициента раздачи. Показано, что с увеличением степени деформации зона образования складки смещается к месту свободного изгиба заготовки. Полученные данные можно использовать для интенсификации операции раздачи, путем установки жестких элементов подпора в определенных местах возможной потери устойчивости.

### **Список использованной литературы**

1. Шофман Л.А. Элементы теории холодной штамповки / Л.А. Шофман – М.: Оборонгиз, 1952. – 335 с.
2. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
5. Ильюшин А. А. Пластичность. Уругопластические деформации. Ч. 1 / А.А. Ильюшин. – М.: ОГИЗ, 1948. – 377 с.
6. Пузырь Р.Г. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздаче коническими пуансонами / Р.Г. Пузырь, О.В. Троцко, В.Ю. Черкашенко // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 114-121.