

УДК 621.7.044

Пузырь Р. Г.  
Аргат Р. Г.  
Гайкова Т. В.

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПРИЛОЖЕНИИ НАГРУЗКИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ЗАГОТОВКУ

Процессы радиально-ротационного профилирования принято считать достаточно производительными и экономичными за счет локального приложения внешних усилий. Их применяют для производства ободьев колес транспортных средств различного назначения, при изготовлении полых изделий с профилем, а также для получения элементов жесткости и элементов крепления на цилиндрических и конических поверхностях.

Для производства ободьев колес применяют листовую заготовку из сталей 08кп, 10пс, 15ЮА, толщиной от 3 до 8 мм, свернутую в цилиндрическую обечайку. Форма профиля для различных моделей ободьев приобретает постепенно за 3–4 перехода профилирования. За счет локализации деформации удается значительно снизить усилия формоизменения, получать сложную конфигурацию профиля изделия, применять оборудование меньшей мощности по сравнению с прессами для операций обжима, раздачи и т. д. При малой мощности обеспечивается возможность создания высоких относительных давлений (благодаря небольшой площади контакта инструмента и заготовки), что позволяет повысить пластичность материала заготовки [1]. Так как не вся заготовка одновременно участвует в деформировании, то форма рабочих поверхностей инструмента может отличаться от формы готовой детали, что позволяет использовать один и тот же инструмент для штамповки разных по размерам и форме деталей.

Радиально-ротационное профилирование как и ротационную вытяжку можно отнести к операциям с дополнительной локализацией очага пластической деформации, где местное воздействие деформирующего инструмента образует локальный очаг пластической деформации, окруженный упругодеформируемыми зонами. При определенных условиях (соотношениях геометрических размеров заготовки, детали и инструмента, осевой подачи и т. д.) напряженное состояние в очаге деформации может приближаться к трехосному сжатию, в связи с чем, существенно будут повышаться пластические характеристики материала и может быть увеличена предельно допустимая степень деформации [2], [3].

Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния при локальном приложении нагрузки на цилиндрическую заготовку, который необходимо проводить с учетом упругих деформаций, возникающих в ее ненагруженных частях, что позволит более точно учитывать совокупность различных факторов, влияющих на распределение деформаций в готовом изделии. Целенаправленно оказывать влияние на очаг деформации с целью создания благоприятных условий формоизменения. Для этого необходимо различать местное нагружение и нагрузку, распределенную по всему сечению заготовки.

В работе [4] была поставлена и решена задача по определению распределения напряжений в упругой области при действии на цилиндрическую заготовку распределенной кольцевой нагрузкой (рис. 1). При ее решении были приняты допущения, основанные на гипотезах Кирхгофа – Лява:

1. Гипотеза неизменности нормалей. Принимают, что нормали к срединной поверхности оболочки не искривляются и остаются перпендикулярными к деформированной срединной поверхности. Эта гипотеза устанавливает связь между деформированным состоянием в произвольной точке стенки оболочки и изменением геометрии ее срединной поверхности и позволяет таким образом свести исследование деформации оболочки к исследованию деформации ее срединной поверхности.

2. Гипотеза о ненадавливании одного слоя оболочки на другой. Согласно этой гипотезе, нормальные напряжения в площадках, параллельных срединной поверхности, считают равными нулю, т. е. напряженное состояние рассматривают как плоское вместо объемного.

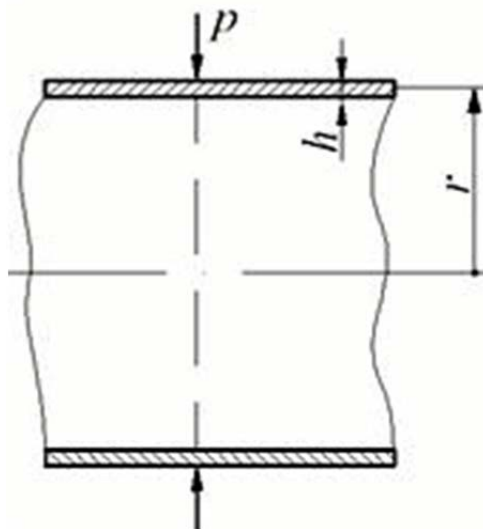


Рис. 1. Цилиндрическая оболочка под действием кольцевой нагрузки

Рассматривали равновесие элементарного объема, выделенного из оболочки двумя продольными и двумя поперечными сечениями, что дало возможность получить зависимости для перемещений, изгибающих моментов и окружных усилий:

$$\begin{aligned}
 w &= -\frac{pr^2\beta}{2Eh} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x); \\
 M_x &= -\frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x); \\
 M_t &= \mu M_x; \\
 T_t &= -\frac{Pr\beta}{2} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x), \quad T_x = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\beta = \sqrt{\frac{3|1-\mu^2|}{r^2 h^2}}$ ;

$E$  – модуль Юнга;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$r$  – радиус заготовки;

$h$  – толщина заготовки;

$w$  – прогиб заготовки;

$M_x$  – момент, действующий относительно оси  $OX$ ;

$T_t$  – усилие, действующее в окружном направлении;

$M_t$  – момент, действующий в окружном направлении;

$T_x$  – усилие, действующее в направлении оси  $OX$ ;

$P$  – прикладываемая нагрузка.

В данной работе задача ставится следующим образом: найти распределение внутренних усилий при локальном действии нагрузки на поверхности цилиндрической заготовки (рис. 2).

Эта задача наиболее просто решается методом наложения. Заданную нагрузку можно представить в виде суммы двух нагрузок, показанных на рис. 2, б и в (обе эти нагрузки, по существу, одинаковые) [5].

Получим решение для нагрузки, изображенной на рис. 2, в. Начало координат совместим с сечением, соответствующим скачку давления. На основании обратной симметрии нагрузки:

$$\text{при } x = 0, w = 0;$$

$$\text{при } x = 0, \frac{d^2 w}{dx^2} = 0.$$

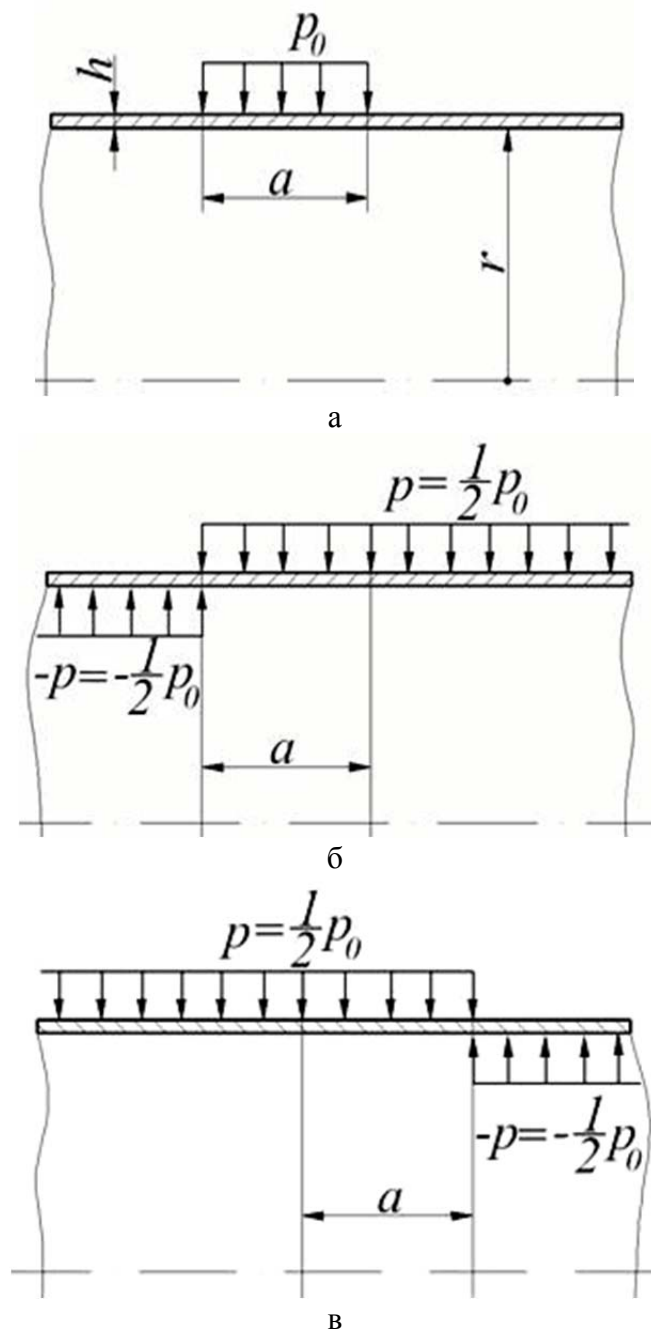


Рис. 2. Расчетная схема:

а – нагружение заготовки локальной распределенной нагрузкой  $p_0$  протяженностью  $a$ ;  
б, в – расчетные схемы

При  $x=0$  упругая поверхность имеет точку перегиба. Из граничных условий при  $x=0$  определим поперечную силу  $Q_0$  в начальном сечении. Так как  $M_0 = 0$ , то на основании зависимостей [4]:

$$\frac{Q_0}{2D\beta^3} + \frac{pr^2}{Eh} = 0,$$

откуда:

$$Q_0 = -\frac{pr^2}{Eh} 2D\beta^3 = \frac{P}{2} \beta,$$

где  $D$  – изгибная жесткость оболочки,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ .

Выражения функций  $w, M_x, M_t, T_t$  для нагрузки, изображенной на рис. 2, в, имеют вид:

$$\begin{aligned} w &= \frac{pr^2}{Eh} \beta \left(1 - e^{-\beta x} \cos \beta x\right); \\ M_x &= -\frac{P}{2\beta^2} e^{-\beta x} \sin \beta x; \quad M_t = \mu M_x; \\ T_t &= Pr \left(1 - e^{-\beta x} \cos \beta x\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Эти формулы справедливы для правой половины цилиндра  $x \geq 0$ . Для левой половины цилиндра величины  $w, M_x, M_t, T_t$  отличаются только знаком.

Построив по полученным формулам эпюры для нагрузок  $w, M_x$ , изображенных на рис. 2, б и в и сложив их, получим эпюры для заданной нагрузки.

На рис. 3 приведено построение, соответствующее следующим данным:  $\frac{r}{h} = 100$ ,

$$\beta = 12,85 \frac{1}{r}, \quad a = 0,2r.$$

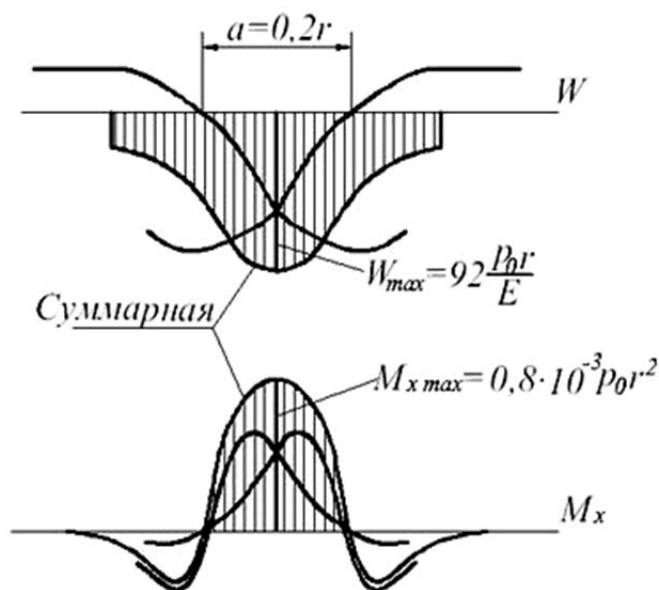


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов и перемещений

Наибольший прогиб  $w_{\max} = 92 \frac{p_0 r}{E}$ , наибольший изгибающий момент  $M_{x \max} = 0,8 \cdot 10^{-3} p_0 r^2$ .

Эти значения интересно сравнить со значениями, полученными в работе [4], (1) для случая нагружения сосредоточенной кольцевой нагрузкой.

Сравнение показывает, что при действии распределенной нагрузки величина прогиба примерно в 1,5 раза, а величина максимального изгибающего момента приблизительно в 5 раз меньше, чем при сосредоточенной нагрузке.

## ВЫВОДЫ

Данное решение дает наглядную картину распределения внутренних усилий в цилиндрической заготовке в зоне локального силового воздействия. При сосредоточенном действии деформирующего усилия материал заготовки будет испытывать большие деформации по сравнению с распределенной кольцевой нагрузкой, причем максимальное усилие в тангенциальном направлении будет равно  $T_t = P_0 r$ . Можно предположить, что положение не изменится и при переходе материала за предел упругости, т. е. меридиональные напряжения будут отсутствовать, что подтверждается исследованиями Е. А. Попова [3] для обжима цилиндрических заготовок, а тангенциальные будут зависеть от диаметра заготовки, и чем диаметр исходной заготовки больше, тем меньшее усилие потребует приложить для формоизменения.

Для уточнения напряженно-деформированного состояния при профилировании цилиндрических заготовок необходимо использовать математический аппарат теории оболочек, что даст возможность более рационально влиять на очаг деформации с целью получения качественных изделий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов В. И. *Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки : учебное пособие [для ПТУ] / В. И. Ершов. – М. : Высш. шк., 1989. – 87 с.*
2. Попов Е. А. *Технология и автоматизация листовой штамповки : учебник для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 480 с.*
3. Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.*
4. Пузырь Р. Г. *Анализ напряженного состояния цилиндрической оболочки при наложении кольцевой нагрузки / Р. Г. Пузырь, О. В. Троцко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х., 2011. – № 58. – С. 7–10.*
5. Вольмир А. С. *Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.*

Пузырь Р. Г. – канд. техн. наук, доц. КрНУ им. М. Остроградского;

Аргат Р. Г. – ст. преп. КрНУ им. М. Остроградского;

Гайкова Т. В. – ст. преп. КрНУ им. М. Остроградского.

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: pudik-r@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 29.11.2013 г.*