

УДК 621.7.044

Пузырь Р. Г.
Троцко О. В.**УЧЕТ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ СВАРНЫХ ОБОЛОЧЕК**

Сдерживающим фактором дальнейшего развития и использования прогрессивных технологий формоизменения является предшествующая разрушению локализация деформаций. На интенсивность деформаций, предшествующих разрушению, наиболее существенное влияние оказывает схема напряженно-деформированного состояния и механических характеристик менее и более деформированных частей заготовки [1, 2]. Неравномерность развития деформации нельзя не учитывать при создании и совершенствовании оборудования и процессов формообразования деталей из сварных цилиндрических заготовок [3].

Целью работы является совершенствование технологии формоизменения сварных цилиндрических заготовок путем подбора рациональной схемы напряженно-деформированного состояния. Это позволит повысить точность расчета предельной степени формоизменения и объективность рекомендаций при проектировании технологии и оборудования.

В работе авторов [1] описан способ последовательной гибки деталей с элементом жесткости (рис. 1). Этот метод позволил значительно снизить деформирующие усилия (в 2–4 раза) и нашел применение при изготовлении деталей вагонных конструкций. В предложенном способе, при разгибании полок, деформация центрального участка происходит без воздействия контактных напряжений. Кривизна формируемого элемента жесткости не определяется рабочими поверхностями инструмента, а возникает в результате действия момента. Появление момента связано с образованием пар сил, приложенных к торцу отогнутых полок, и реакциями, приложенными к элементу заготовки, свободно опертому на поверхность постели прессы. По мере изменения кривизны элемента жесткости происходит горизонтальное перемещение площадок контакта в горизонтальном направлении. При этом возникают силы трения, препятствующие формоизменению элемента жесткости. На величину конечного прогиба при заданной ширине полок влияют: усилие необходимое для отгибания полок P_t , величина радиуса сопряжения элемента жесткости с полкой, угол наклона полок, показатели упрочнения материала заготовки.

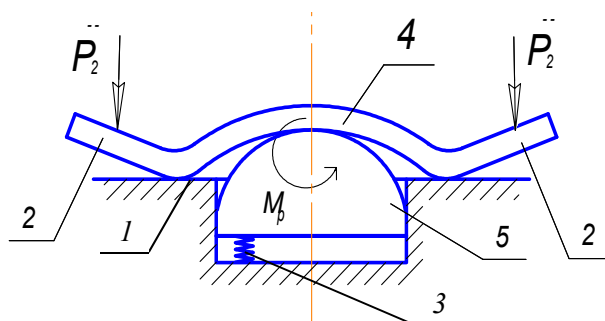


Рис. 1. Получение элемента жесткости на листовой заготовке:

1 – матрица; 2 – технологические полки; 3 – пружина; 4 – реактивный момент; 5 – пуансон

При деформации оболочек вращения получить технологические полки на краевых участках можно операцией раздачи, но дальнейшее применение указанного выше способа для деформирования цилиндрических сварных заготовок требует учета распределения напряжений и деформаций с точки зрения теории оболочек.

Нагружение оболочки на небольшом расстоянии от зоны изгиба (от места приложения сосредоточенных сил или скачкообразного изменения радиусов кривизны) напряженное состояние обычно рассматривается как безмоментное [2]. На краях оболочки, где приложены распределенные поперечные силы или моменты, напряженное состояние можно рассматривать как сумму безмоментного состояния и так называемого краевого эффекта, т. е. местного изгиба стенки оболочки около края. Т. е., если разгибать технологические полки, полученные раздачей на осесимметричной оболочке, то формообразующий момент не распространяется на расстояние, достаточное для формирования элемента жесткости на оболочке. Рассмотрим часть полуфабриката обода, при этом необходимо учитывать угол наклона нормали θ (рис. 2).

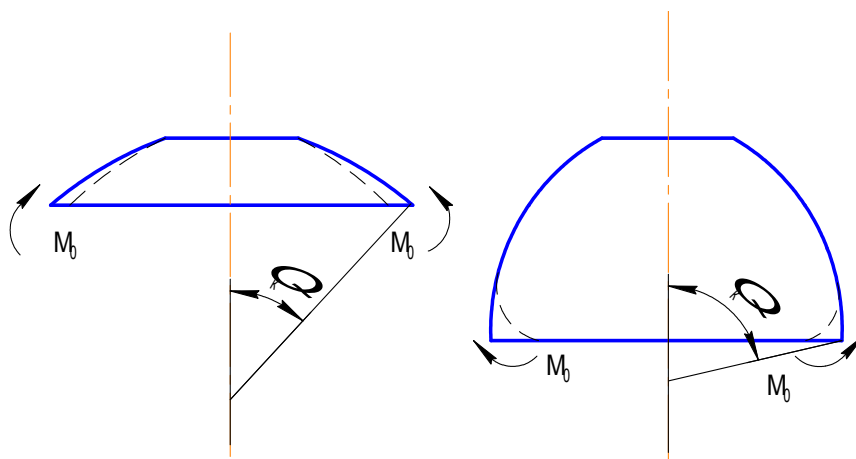


Рис. 2. Перемещения краевых участков оболочки, зависящие от формы меридианов: M_0 – изгибающий момент; θ – угол наклона нормали к меридиану

В первом случае угол наклона нормали θ больше, чем во втором. Здесь при осесимметричном изгибе около края возникает значительное окружное сжатие; вследствие этого изгибные деформации в оболочке быстро затухают и на небольшом расстоянии от края уже практически полностью отсутствуют.

При осесимметричном изгибе второй оболочки радиальные перемещения точек и соответствующие им окружные деформации сжатия около края малы. Поэтому деформации, вызванные изгибающим моментом, затухают медленно, и влияние момента распространяется практически на всю оболочку [3].

В работе [3] была получена формула разрешающего уравнения краевого эффекта:

$$\frac{d^4 V}{d\theta^4} + \frac{R_m^4 E h}{R_t^2 D} V = 0, \quad (1)$$

где $V = QR_t$ – переменная Мейсснера;

Q – сдвигающее усилие;

R_m – радиус заготовки в меридиональном направлении;

R_t – радиус заготовки в тангенциальном направлении;

E – модуль Юнга;

h – толщина заготовки,

D – цилиндрическая жесткость оболочки.

Для упрощения задачи примем, что меридианы заготовки обода колеса представляют собой прямые, значит $R_m = \infty$, и рассмотрим только 1/2 часть полуфабриката (рис. 3).

Поскольку угол θ в этом случае постоянный, он не может быть принят в качестве независимой переменной. За независимую переменную необходимо принять координату s , отсчитываемую вдоль образующей.

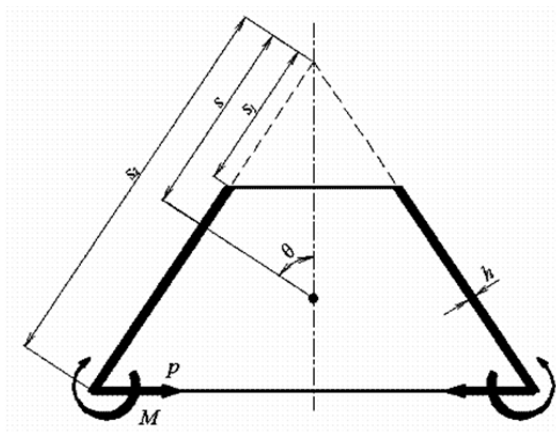


Рис. 3. Расчетная схема для определения напряжений в отогнутых полках

После перехода от переменной θ к переменной s уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\frac{d^4 V}{ds^4} + \frac{Eh}{R_t^2 D} V = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^4 V}{ds^4} + 4\beta^4 V = 0, \quad (2)$$

где $\beta = 4 \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{R_t^2 h^2}}$.

При выводе разрешающего уравнения краевого эффекта было принято допущение [3], что младшие производные функции, а также сами функции пренебрежимо малы по сравнению со старшими производными, и что радиус R_t около края изменяется незначительно. Эти допущения выполняются удовлетворительно для конических оболочек с большим углом наклона образующих ($\theta > 35^\circ - 40^\circ$).

Обозначим через x координату, отсчитываемую от рассматриваемого края оболочки.

Для верхнего края: $x = s - s_0$;

для нижнего края: $x = s_0 - s$,

где s_0 – координата, соответствующая данному краю.

При переходе к переменной уравнение (2) не изменяет своего вида:

$$\frac{d^4 V}{dx^4} + 4\beta^4 V = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) решается в рядах. В результате получаются следующие формулы для внутренних силовых факторов и перемещений:

$$\begin{aligned} V &= \pm M_{m0} 2\beta R_t e^{-\beta x} \sin \beta x + Q_0 R_t e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x); \\ T_m &= \text{ctg } \theta \left[\pm M_{m0} 2\beta R_t e^{-\beta x} \sin \beta x - Q_0 R_t e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \right]; \\ T_t &= 2\beta R_t \left[M_{m0} \beta e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \pm Q_0 e^{-\beta x} \cos \beta x \right]; \\ M_m &= M_{m0} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \pm Q_0 \frac{1}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x; \quad M_t = \mu M_m; \\ \vartheta &= \pm M_{m0} \frac{1}{\beta D} e^{-\beta x} \cos \beta x + Q_0 \frac{1}{2\beta^2 D} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x). \end{aligned} \quad (4)$$

где M_{m0}, Q_0 – силовые факторы на краю оболочки.

Верхние знаки в формулах (4) относятся к верхнему краю пояса оболочки; нижние, соответственно, к нижнему. Для наглядности подставим цифровые значения для оболочки, изображенной на рис. 4:

$$h = 0,5 \text{ см}; \theta = 60^\circ; s_1 = 10 \text{ см}; s_2 = 30 \text{ см}; R_t = s_2 \operatorname{ctg} \theta = 17,3 \text{ см}.$$

Параметр β для нижнего края согласно формуле (2):

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R_t^2 h^2}} = 0,4365.$$

Силовые факторы на нижнем крае:

$$M_{m0} = M; Q_0 = P \sin 60^\circ = 0,866P.$$

По формулам (4), полагая в них $x = 0$, вычислим угловое перемещение и силовые факторы на нижнем краю оболочки:

$$\vartheta = \frac{M}{\beta D} + \frac{Q_0}{2\beta^2 D} = -2,29 \frac{M}{D} + 2,28 \frac{P}{D};$$

$$T_m = -Q_0 \operatorname{ctg} \theta = -P \sin \theta \operatorname{ctg} \theta = -0,5P;$$

$$T_t = 2\beta R_t (M\beta - Q_0) = 6,58M - 13,1P.$$

ВЫВОДЫ

Из полученного решения видно, что угловые перемещения края будут уменьшаться с увеличением цилиндрической жесткости оболочки при одинаковой нагрузке, тем самым передавая больший изгибающий момент на противоположный край сечения. С увеличением координаты x в отогнутых полках меридиональные напряжения растут, создавая подпирющий эффект на очаг деформации. Цилиндрическая жесткость конической оболочки будет тем больше, чем больше угол наклона образующих к оси симметрии, значит, первую операцию раздачи краевых элементов цилиндрической заготовки требуется проводить с возможно большим коэффициентом раздачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгобецкий В. В. *Высокоэффективные технологии самопроизвольного изменения тонколистовых заготовок [Текст]* / В. В. Драгобецкий, Д. В. Мосьпан, Н. Н. Мороз // *Прогрессивные методы и технологии процессов обработки металлов давлением : мат. междунар. науч.-техн. конф. – Бал. гос. техн. ун-т. – СПб, 2009. – С. 77–81.*
2. Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки [Текст]* / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
3. Тимошенко С. П. *Пластинки и оболочки [Текст]* / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Наука, 1966. – 636 с.
4. Вольмир А. С. *Устойчивость деформируемых систем [Текст]* / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

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

Троцко О. В. – канд. техн. наук, доц. КрНУ им. М. Остроградского.

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

E-mail: kafea@polytech.poltava.ua

Статья поступила в редакцию 28.02.2012 г.