

УДК 621.983.044

АППРОКСИМАЦИЯ КОНТУРА ОБОЛОЧЕК
ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ ФОРМУЛОЙ ЛЯМЕ

А.С. Анищенко, В.В. Кухарь, Е.А. Мкртчян

Показана целесообразность аппроксимации контура оболочек на всех стадиях сверхпластической формовки с помощью «суперэллипса» Ляме.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка; аппроксимация; контур; стадия; суперэллипс.

APPROXIMATION CONTOUR SHELLS IN SUPERPLASTIC FORMING
WITH APPLICATION OF THE FORMULA LAMÉ

A.S. Anicshenko, V.V. Kukhar, E.A. Mktrshian

The article shows the advisability of approximation of shell contour at all stages of superplastic forming by Lamé "superellipse".

Keywords: superplastic forming; approximation; contour; stage; superellipse.

Сверхпластическая формовка (СПФ) оболочек из листовых заготовок является эффективным динамически развивающимся процессом ОМД [1, 2]. Постоянное расширение номенклатуры материалов и деталей, изготавливаемых СПФ, обуславливает необходимость в совершенствовании существующих и разработке новых методов расчета этих процессов.

Расчеты процессов СПФ оболочек базируются, как правило, на теории тонкостенных безмоментных оболочек и используют уравнение Лапласа [1]:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{S}, \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 – меридиональное и тангенциальное напряжение в оболочке; R_1 , R_2 – главные радиусы кривизны оболочки; p – давление деформирующей среды; S – толщина заготовки.

При расчетах СПФ рассматриваются обычно две стадии формовки [1, 2] – свободное выпучивание исходной заготовки в полость матрицы до контакта с ее дном и оформление деформируемым металлом угловых зон стаканов или коробок.

Необходимость в постадийном расчете процесса СПФ вызвана, помимо всего прочего, существенными изменениями геометрической формы контура деформируемой заготовки при переходе от свобод-

ной формовки к затеканию в угловые зоны сопряжения поверхностей стаканов и коробок. Кроме того, изменяются контактные условия трения на границе заготовка-штамп. Немонотонная эволюция контура заготовки при СПФ вызывает резкие изменения значений радиусов кривизны R_1 и R_2 , что усложняет расчеты по формуле Лапласа (1).

Радиусы кривизны R_1 и R_2 обычно определяют аппроксимацией экспериментальных данных различными формулами. При расчетах технологии СПФ переход от одной стадии к другой зачастую связан с изменением системы координат, исходных допущений, граничных условий. Это усложняет расчеты и снижает их точность.

Цель настоящей работы – определение возможности аппроксимации контура деформируемой заготовки единой универсальной формулой на всех стадиях СПФ.

Наглядное представление о контуре оболочек при СПФ дает формула Ляме [3], называемая «суперэллипсом» и имеющая вид:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^m = 1, \quad (2)$$

где n и m – показатели степени; a и b – коэффициенты, $a > 0$, $b > 0$.

В зависимости от величин n , m , a и b графики формулы (3) описывают все контуры (парабола,

Таблица 1 – Формулы аппроксимации реальных контуров оболочек при СПФ

Для оболочек с $H = R$		Для оболочек с $H = 0,6R$	
Параметры оболочки	Аппроксимирующая формула в безразмерном виде	Параметры оболочки	Аппроксимирующая формула в безразмерном виде
Сплав $AM\epsilon 6$, заготовка переменной толщины	$Y_{AM\epsilon 6} = (1 - X_R^{2,58})^{1/1,96}$	СПФ сегмента в неравномерном температурном поле	$Y_{TP} = 0,6 [1 - (X_S^1)^{2,36}]^{1/1,23}$
Сплав $Sn-38 \%Pb$, $t = 0,60$	$Y_{t0,6} = (1 - X_R^{2,02})^{1/1,92}$	Формовка со смазкой стакана	$Y_L = 0,6 [1 - (X_L^1)^{3,03}]^{1/1,32}$
Сплав $Sn-38 \%Pb$, $t = 0,25$	$Y_{t0,25} = (1 - X_R^{1,98})^{1/1,72}$	Формовка стакана без смазки	$Y_{NL} = 0,6 [1 - (X_{NL})^{2,58}]^{1/1,64}$
Сплав $AlMg5$	$Y_{AlMg5} = (1 - X_R^{1,99})^{1/1,78}$	СПФ сегмента в изотермических условиях	$Y_P = 0,6 [1 - (X_P)^{1,94}]^{1/1,28}$

окружность, эллипс, прямоугольник со скругленными углами), которые имеют листовые заготовки на различных стадиях СПФ.

Рассмотрим геометрическую форму оболочек с $H = R$ (на первой стадии) и $H = 0,6R$ (на двух стадиях СПФ) и особенности ее аппроксимации формулой Ляме, используя экспериментальные данные работ [2, 4, 5]. Для аппроксимации контуров с $H = R$ были выбраны оболочки из сплавов $AlMg5$ [2], $AM\epsilon 6$ [5] и $Sn-38 \%Pb$ с различными значениями коэффициента скоростного упрочнения $t = 0,25$ и $0,6$ [4]. Заготовки из сплава $AM\epsilon 6$ имели переменную толщину: $S_0 = 1,45$ мм в центральной части диаметром 60 мм и $S = 1,23$ мм на кольцевом периферийном участке внешним и внутренним диаметрами, равными соответственно 100 и 60 мм.

Для аппроксимации контуров с $H = 0,6R$ были выбраны оболочки из сплава $AlMg3$ [2] в форме: а) сфероподобных сегментов, отформованных на первой стадии СПФ в изотермических условиях и в неравномерном температурном поле; б) промежуточных полуфабрикатов стакана, формируемых на второй стадии СПФ в цилиндрическую матрицу.

В таблице 1 приведены формулы Ляме, аппроксимирующие контуры оболочек с $H = R$ и с $H = 0,6R$.

Сферический сегмент (SG), образуемый на начальных стадиях СПФ заготовки, имеет контур, который аппроксимируется уравнением окружности:

$$\left(\frac{x}{R_k}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_k}\right)^2 = 1, \quad (3)$$

где R_k – радиус кривизны окружности, образующей контур сегмента с хордой $2R$ и высотой H .

Если начало координат находится в точке пересечения высоты и радиуса основания сегмента,

а высота сегмента $h = \beta R$, то формула (3) примет вид:

$$y = \frac{h(1+\beta^2)}{2\beta^2} \left[1 - \left(\frac{2\beta x}{(1+\beta^2)R} \right)^2 \right]^{1/2} - h \left(\frac{1-\beta^2}{2\beta^2} \right) \quad (4)$$

или в безразмерном виде:

$$Y_{SG} = \frac{1+\beta^2}{2\beta} \left[1 - \left(\frac{2\beta X_{SG}}{1+\beta^2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{1-\beta^2}{2\beta}. \quad (5)$$

В частности, для полусферической оболочки ($\beta = 1, R_k = h = R$) имеем:

$$y = R \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{или} \quad Y_0 = (1 - X_0^2)^{1/2}, \quad (6)$$

где $X_0 = r/R, Y_0 = h/R$ – безразмерные координаты точек контура окружности, изменяющиеся в интервале $0 \leq (r;h) \leq 1$; r и h – текущие значения радиуса основания и высоты оболочки.

На рисунках 1 и 2 представлены относительные отклонения q реальных контуров оболочек с $H = R$ и $H = 0,6R$ от контуров полусфер Y_0 и сферических сегментов Y_{SG} с радиусом основания R . Относительное отклонение определяли как $q = Y_i / Y_j$, где Y_i – аппроксимирующие функции реальных контуров оболочек (см. таблицу 1); Y_j – формулы окружности Y_0 (6) и сферического сегмента Y_{SG} (5).

Кривые 2–4 на рисунке 1 подтверждают: чем меньше коэффициент t , тем в большей степени контур оболочек отклоняется от сферического в сторону параболы. При этом в аппроксимируемых формулах $m < n < 2$. Однако для заготовки переменной толщины контур оболочки на первой стадии СПФ смещен в ее центральных зонах в сторону эллипса (кривая 1, рисунок 1). Аппроксимирующая функция $Y_{3ПТ}$ при этом характеризуется параметром $n > 2$.

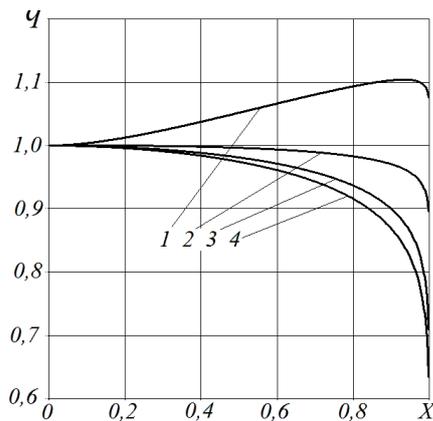


Рисунок 1 – Распределение соотношения ординат реальных контуров оболочек с $H = R$ и полусферы вдоль их радиуса основания:

$$1 - q = Y_{ЗПТ}/Y_0; \quad 2 - q = Y_{t,0,6}/Y_0;$$

$$3 - q = Y_{AlMg3}/Y_0; \quad 4 - q = Y_{t,0,25}/Y_0$$

Параболообразная форма оболочки ($n < 2$) имеет место и при высоте $H = 0,6R$ (рисунок 2, кривая 4). Однако отклонение q в этом случае не превышает 0,03 в достоверном интервале изменений, тогда как для оболочек с $H = R$ параметр q находится в пределах 0,04–0,18.

Подстуживание центра заготовки тормозит утонение этих зон в оболочке и отклоняет ее контур (рисунок 2, кривая 3) в зонах полюса от сферического в сторону эллипса ($n > 2$). Максимум отношения ординат аппроксимирующих функций Y_{TP} и Y_P в этом случае составляет $q_{max} = 1,1$ при $X = 0,84$.

Вторая стадия СПФ при формовке стакана с $H = 0,6R$ формирует контур полуфабриката, который существенно зависит от наличия смазки на донной поверхности матрицы. При формовке без смазки участки оболочки, находящиеся в контакте с дном матрицы, практически не деформируются, и оформление контуров стакана происходит за счет утонения свободных зон оболочки. Наличие смазки на границе оболочка-дно матрицы вызывает дальнейшее утонение полюсных зон оболочки на второй стадии СПФ [2].

Таким образом, по значениям коэффициентов n и m формулы (2), можно на качественном уровне описать кинематику течения металла заготовки, форму изготавливаемой оболочки, стадию СПФ и наличие операций регулирования течения деформируемого металла. Из формулы Ляме (2) определяются радиусы кривизны оболочки на

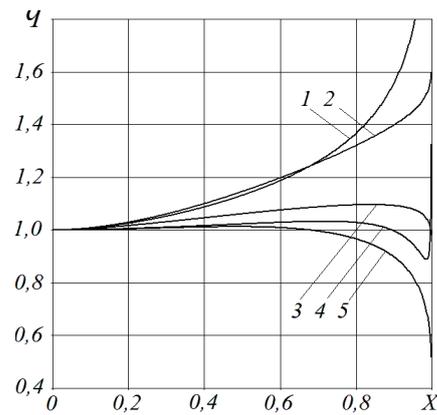


Рисунок 2 – Распределение соотношения ординат контуров оболочек с $H = 0,6R$ из сплава $AlMg3$ вдоль их радиуса основания:

$$1 - q = Y_{NL}/Y_P; \quad 2 - q = Y_L/Y_P; \quad 3 - q = Y_{TP}/Y_P;$$

$$4 - q = Y_0/Y_P; \quad 5 - q = Y_L/Y_{NL}$$

всех стадиях СПФ, необходимые для расчетов напряженно-деформированного состояния формируемого изделия.

Литература

1. *Голенков В.А.* Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 474 с.
2. *Анищенко А.С.* Изотермическая и сверхпластическая деформация металлов / А.С. Анищенко. Saarbrücken: LAP, 2014. 129 с.
3. *Sadowsky A.J.* Exploration of novel geometric imperfection forms in buckling failures of thin-walled metal silos under eccentric discharge / A.J. Sadowsky, A.M. Rotter // *International Journal of Solids and Structures*. 2012. V.50. P. 781–794.
4. *Lechten J.-P.* Analyses theorique et experimentale du gonflement dans le domaine de superplasticite / J.-P. Lechten, J.-C. Patrat, B. Baudalet // *Revue de Physique Appliquee*. 1977. № 12 (1). P. 7–14.
5. *Смирнов О.М.* Способы уменьшения разнотолщинности при пневмостатической формовке куполообразных полых деталей в режиме сверхпластичности / О.М. Смирнов [и др.] // *Теория и технология обработки металлов давлением: сб. науч. тр. МИСиС. М.: МИСиС, 1979. №113. С. 70–75.*