

Моделирование процесса пластического формообразования с минимальной разнотолщиной оболочек

Е.Г. Демьяненко^а, И.П. Попов^а, А.Н. Епифанов^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара Россия

Аннотация

В данной работе предложен метод, основанный на использовании программного комплекса Pam-Stamp 2G (ESI Group) и теоретического решения функционала, обеспечивающий минимальную разнотолщину оболочек бочкообразной формы при деформировании. В качестве вариационного параметра выбран коэффициент трения. Его рассчитанные значения послужили исходными данными для моделирования.

Ключевые слова: математическая модель; функционал; минимальная разнотолщина; Pam-Stamp 2G (ESI Group); формообразование.

1. Введение

Проектирование новых технологических процессов на современном этапе невозможно без применения средств теоретического анализа, позволяющих в виде компьютерного моделирования получить точную картину распределения полей напряжения и деформаций по объему заготовки, определить ее размеры в любой момент формообразования [1], а так же ресурс деформационной способности. Такой подход позволяет разработать технологический процесс, значительно сократив сроки внедрения их в производство. Целью исследования является разработка метода, основанного на использовании программного комплекса с модулем теоретического решения функционала, обеспечивающего минимальную разнотолщину оболочек бочкообразной формы при деформировании.

2. Объект исследования

В задаче направленного изменения толщины заготовки следует достигнуть приближения технологически возможной толщины S_T к заданной толщине детали $S_{зад}$ при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин.

$$\iint_F (S_T - S_{зад})^2 dF \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $S_{зад}$ - заданная толщина детали;

S_T - технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки;

F - площадь детали по срединной поверхности.

Используя аналитическую зависимость (1), условие для осесимметричной детали может быть представлено как:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \rightarrow \min, \quad (2)$$

где l - длина образующей детали.

3. Метод, теоретические основы

В первую очередь, предложенное условие можно выполнить, подобрав способ формообразования с соответствующей схемой напряженно-деформированного состояния, обеспечивающий надежность и устойчивость процесса. Во вторую очередь, направленно изменять толщину заготовки, приближая ее к заданной, возможно путем использования технологических параметров процесса: исходными размерами заготовки, трением, геометрией инструмента, анизотропией трансверсально-изотропного тела, граничными условиями. В качестве возможного способа выбрана формовка, варьируемым параметром – трение (рассмотрен случай, когда влияние трения при формообразовании детали значимо). Для составления математической модели необходимо записать уравнение равновесия [2]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta + \frac{f\rho}{\sin \alpha_3} \left(\pm \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (3)$$

где знак «+» обозначает выпуклую деталь; «-» – вогнутую;

σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении;

f - коэффициент трения.

Принятая схема действия сил трения на заготовку представлена ниже (см. рисунок 1).

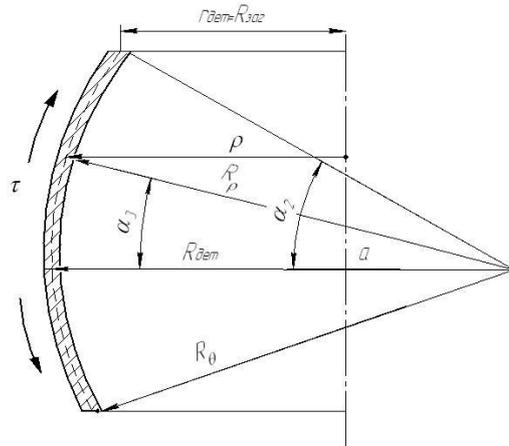


Рис. 1. Схема действия сил трения на заготовку при формообразовании детали бочкообразной формы.

По рис. 1: R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении; R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении; r_{dem} - меньший радиус детали; R_{dem} - больший радиус детали; ρ - текущий радиус детали; α_3 - текущий угол; α_2 - угол, образованный радиусом R_ρ , проведенным к кромке детали и радиусом R_{dem} ; a - расстояние от центра радиуса R_ρ до оси симметрии детали.

Из геометрии (см. рисунок 1):

$$\rho = R_\rho \cos \alpha_2 - a, \quad (4)$$

при: $\alpha_3 = 0$

$$R_\rho = a + R_{dem},$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{1 + \bar{a}}{R_{dem} + a}, \quad (5)$$

где $\bar{R}_{dem} = \frac{R_{dem}}{r_{dem}}$, $\bar{a} = \frac{a}{r_{dem}}$.

Считая, что материал заготовки обладает свойствами трансверсально-изотропного тела [3], запишем условие пластичности [4]:

$$\sigma_\theta = k \sigma_S = \sigma_S^*, \quad (6)$$

где σ_S - напряжение текучести;

k - коэффициент, равный $k = \sqrt{2} \sqrt{1 - \mu}$ [4];

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Уравнение равновесия сил примет вид при $R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha_3}$:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 \pm \frac{f\rho}{R_\rho \sin \alpha_3} \right) - \sigma_S^* (1 - f \operatorname{ctg} \alpha_3) = 0, \quad (7)$$

где α_3 - угол наклона касательной, проведенной к элементу с координатой радиусом ρ и осью симметрии детали.

Запишем последнее выражение (7) в виде:

$$\frac{d\sigma_\rho}{\sigma_\rho \left(1 \pm \frac{f\rho}{R_\rho \sin \alpha_3} \right) - \sigma_S^* (1 - f \operatorname{ctg} \alpha_3)} = - \frac{d\rho}{\rho}. \quad (8)$$

$$\sigma_\rho = \frac{1}{m} \sigma_S^* (1 - f \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \left(1 - \left(\frac{r_{dem}}{\rho} \right)^m \right) + \sigma_\rho^* \left(\frac{r_{dem}}{\rho} \right)^m, \quad (9)$$

где обозначено:

$$1 \pm \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}} = m = const, \quad (10)$$

$$\rho_c = R_\rho \cos \alpha_{3c} - a,$$

$$\alpha_{3c} = \alpha_2 / 2. \quad (11)$$

где α_{3c} - средний угол.

Из уравнения связи [5]:

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}{1 - \mu \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}} \left(1 - \frac{r_{dem}}{\rho} \right) \right]. \quad (12)$$

Считая, что верхняя и нижняя половины заготовки симметрична, запишем условие (2) с учетом (9) и разложения в степенной ряд с первыми двумя членами относительно коэффициента трения:

$$\int_1^{\bar{r}_{dem}} \left[\bar{S}_{dem} - 1 + (1 - \mu) \left(A + B \cdot f \right) \left(\frac{\rho}{r_{dem}} - 1 \right) \right]^2 d\rho \rightarrow \min, \quad (13)$$

Запишем выражение (13) через суммы:

$$\sum_{i=1}^n \left[\bar{S}_{dem} - 1 + (1 - \mu) \left(A_i + B_i \cdot f \right) \left(\frac{\rho_i}{r_{dem}} - 1 \right) \right]^2 \Delta \rho_i \rightarrow \min, \quad (14)$$

где f - коэффициент трения между поверхностями матрицы и эластичного элемента;

$$A_i = \frac{2 + \frac{r_{dem}}{\rho_i} \left(\bar{\sigma}_\rho^* - 1 \right)}{1 - \mu \left[1 + \frac{r_{dem}}{\rho_i} \left(\bar{\sigma}_\rho^* - 1 \right) \right]};$$

$$B_i = (1 + \mu) \frac{\frac{r_{dem}}{\rho_i} \left(\bar{\sigma}_\rho^* - 1 \right) \ln \left| \frac{r_{dem}}{\rho_i} \right| - \left(ctg \alpha_c + \frac{\rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}} \right) \left(1 - \frac{r_{dem}}{\rho_i} \right)}{\left\{ 1 - \mu \left[1 + \frac{r_{dem}}{\rho_i} \left(\bar{\sigma}_\rho^* - 1 \right) \right] \right\}^2};$$

$$\bar{\sigma}_\rho^* = \frac{\sigma_\rho^*}{\sigma_S};$$

$$\bar{\sigma}_\rho = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_S^*};$$

$$\bar{S}_{dem} = \frac{S_{dem}}{S_{заг}}.$$

Заданная толщина представляет собой относительную постоянную величину и определяется из условия минимального утонения в наибольшем сечении детали при меридиональном напряжении равным нулю. Из выражения (12) получим:

$$\bar{S}_{dem} = \bar{S}_{dem \min} = 1 - (1 - \mu) \left(1 - \frac{r_{dem}}{R_{dem}} \right). \quad (15)$$

Для выполнения условия (14) в качестве вариационного параметра, обеспечивающего минимизацию функционала (2), выбирается коэффициент трения. Решение (14) примет вид:

$$f = - \frac{\left(\bar{S}_{dem} - 1 \right) \sum_{i=1}^n B_i \left(\frac{\rho_i}{r_{dem}} - 1 \right) + (1 - \mu) \sum_{i=1}^n A_i B_i \left(\frac{\rho_i}{r_{dem}} - 1 \right)}{\left(1 - \mu \right) \sum_{i=1}^n B_i^2 \left(\frac{\rho_i}{r_{dem}} - 1 \right)^2}. \quad (16)$$

4. Результаты моделирования

При разработке более совершенных способов формообразования приближенные методы сложны в освоении и поиске решения, но моделирование процессов формообразования в средах специализированных конечно-элементных

программных комплексов требует подготовленного решения для анализа разнотолщинности. Рассчитанные значения коэффициент трения (16): $f = 0,1$, $f = 0,4$ послужили исходными данными для дальнейшего моделирования. При оптимизации технологических режимов листовой штамповки используют различные программы конечно-элементного моделирования: LS-DYNA, ANSYS, Abaqus, QFORM, DEFORM [6], но применительно к тонкостенным оболочкам наиболее подходящим программным комплексом является Pam-Stamp 2G (ESI Group). Именно данный комплекс был использован в дальнейшем моделировании.

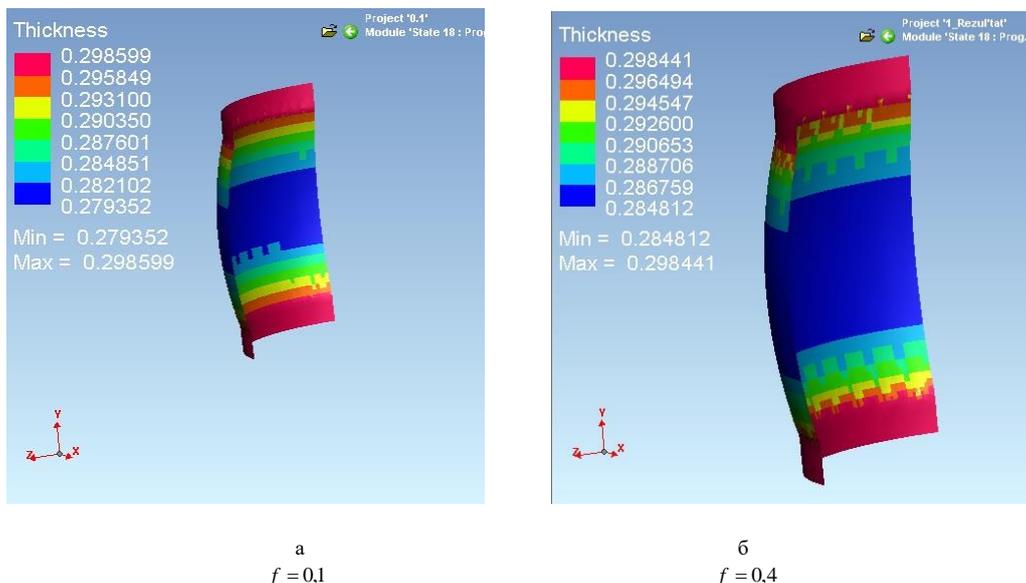


Рис. 2. Распределение толщины оболочки вдоль образующей при $\bar{\sigma}_p = 0,1$; $\mu = 0,5$; $\frac{R_{oem}}{r_{oem}} = 1,1$.

5. Выводы

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что (см.рис. 2 б) область минимальной разнотолщинности тонкостенной оболочки при использовании в процессе значения коэффициент трения $f = 0,4$ значительно шире, чем при $f = 0,1$.

Литература

- [1] Захаров, О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке / О.В. Захаров - Саратов: СГТУ, 2006. - 152 с.
- [2] Демьяненко, Е.Г. Исследование возможностей процесса формовки в устройстве с применением разжимных секторов / Е.Г. Демьяненко - Самара: Известия Снц РАН, 2012. - №6-1 (14). - с. 182-186.
- [3] Ерисов, Я.А. Разработка критерия пластичности для расчетов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок / Я.А. Ерисов, Ф.В. Гречников – Самара: Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012. - №1. - с. 94-99.
- [4] Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов / Ф.В. Гречников - Москва: Машиностроение, 1998. – 448 с.
- [5] Demyanenko, E.G. A Technique of Shaping the Barrel-Type Pats / E.G. Demyanenko - Russian Aeronautics, 2014. - Vol. 57 (2). - P. 204-211.
- [6] Zvonov, S. The quality improvement in manufacturing "Screw" - parts using the DEFORM-3D software / S. Zvonov, A. Shlyapugin // Key Engineering Materials. - 2016. - P. 468-472.