

**Анализ формоизменения оболочек из листовых заготовок при
формовке в состоянии сверхпластичности**

О.М. Смирнов, Я.М. Охрименко, М.А. Цепин, А.С. Анищенко

1. Введение

Существующий подход к анализу процесса формовки листовых материалов в состоянии сверхпластичности давлением газовой среды [1-6] базируется в основном на использовании уравнения установившейся ползучести вида

$$\sigma_e = K \xi_e^m, \quad (1)$$

где σ_e - интенсивность напряжений течения, МПа;

ξ - интенсивность скоростей деформации, c^{-1} ;

m - показатель скоростного упрочнения;

K - коэффициент, зависящий от свойств материала.

При этом в расчетах принимается постоянство m и K на протяжении всего процесса формоизменения, хотя теоретически и экспериментально показано, что интенсивность скоростей деформации меняется при формовке в пределах нескольких порядков [2, 3], а m и K зависят от скорости деформации [1, 6, 7].

С практической точки зрения для инженерных расчетов технологических параметров формоизменения оболочек под действием давления газовой среды представляет интерес использование реологического уравнения состояния упруго-вязко-пластичной (EVP) среды, предложенного в работе [1]. Для описания сверхпластического течения металлических материалов оно может быть записано в виде

$$\sigma_e = \sigma_s \frac{\sigma_0 + K \xi_e^{m_v}}{\sigma_s + K \xi_e^{m_v}}, \quad (2)$$

где σ_s - предел текучести деформируемого материала, получаемый

экстраполяцией σ_e при достаточно больших скоростях деформации

($\xi > 10^3 \div 10^4 c^{-1}$), МПа;

σ_0 - пороговое напряжение, ниже которого пластическое течение

отсутствует, МПа;

m_v и K_v - коэффициента, характеризующие нелинейные свойства упруго-вязкого элемента EVP-среды.

Достоинством уравнения (2) является инвариантность по отношению к скорости деформации входящих в него реологических параметров σ_0, σ_s, m_v и K_v , которые постоянны в широком диапазоне скоростей при условии изотермического деформирования и применительно к материалам с устойчивой мелкозернистой структурой.

Уравнение (2) относительно интенсивности скоростей деформации можно выразить в следующей форме:

$$\xi_e = C \left(\frac{\sigma_e - \sigma_0}{\sigma_s - \sigma_e} \right)^n, \quad (3)$$

где $C = \left(\frac{\sigma_e}{K_v} \right)^n$; $n = \frac{1}{m_v}$; $C = const$; $n = const$.

Следует отметить, что если принять в качестве приведенного напряжения

$$\sigma_e^{\Pi} = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\sigma_s - \sigma_e}, \quad (4)$$

получим соотношение, тождественное по структуре уравнению (1):

$$\xi_e = C (\sigma_e^{\Pi})^n. \quad (5)$$

Это свидетельствует от преимственности предлагаемого ниже анализа процесса формовки по отношению к ранее выполненным работам [2-7].

Для случая свободного выпучивания жесткой зажатой по контуру листовой заготовки в круглую в плане матрицу под действием равномерно распределенного давления с достаточной для инженерных целей точностью за основу может быть принят подход Ф. Джованни [2].

Вводя допущения об отсутствии анизотропии и деформационного упрочнения формуемого материала, пренебрегая упругими деформациями, а также изгибающими моментами и касательными напряжениями вблизи перетяжной кромки фланца, принимая плосконапряженное состояние выпучиваемого купола, условия несжимаемости и равномерности утонения заготовки в процессе деформации, аппроксимируя поверхность формуемого

купола частью сферы, можно в соответствии с [2] определить основные соотношения для интенсивности напряжений и скоростей деформации:

$$\sigma_e = \frac{r(1+H^2)^2}{4SH} p; \quad (6)$$

$$\xi_e = \frac{2HdH}{(1+H^2)dt}, \quad (7)$$

где r – радиус вытяжного очка матрицы;

S – исходная толщина заготовки;

p – давление деформирующей среды;

H – приведенная высота купола, равная отношению текущей высоты к радиусу матрицы ($H = h/r$).

Дифференциальное уравнение равновесия для элемента поверхности купола относительно вертикальной оси запишем следующим образом:

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\sigma_e}{\sigma_e} + \frac{1-3H^2}{H(1+H^2)} dH \quad (8)$$

с начальными условиями (при $t = 0$) $H = H_0 \neq 0$; $p = p_0$; $\sigma_e \leq \sigma_s$; $\xi_e = \xi_{e0}$.

Рассмотрим случай формовки при постоянном давлении, т.е. $dp = 0$.

Решение уравнения (8) получаем интегрированием по разделенной правой части:

$$\int_{\sigma_s}^{\sigma_e} \frac{d\sigma_e}{\sigma_e} = \int_{H_0}^H \frac{3H^2 - 1}{H(1+H^2)} dH, \quad (9)$$

то есть

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_s} = \frac{H_0(1+H^2)^2}{H(1+H_0)^2}. \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (3) к виду:

$$\xi_e = C \left(\frac{\frac{\sigma_e - \sigma_0}{\sigma_s} - \frac{\sigma_0}{\sigma_s}}{1 - \frac{\sigma_e}{\sigma_s}} \right). \quad (11)$$

Полагая для упрощения $\sigma_0 / \sigma_s \approx 0$ и подставляя соотношение (10) в уравнение (11), получаем зависимость изменения безразмерной интенсивности скоростей деформации от относительной высоты купола:

$$\frac{\xi_e}{C} = \left[\frac{A(1+H^2)^2}{H - A(1+H^2)^2} \right]^n, \quad (12)$$

где $A = \frac{H_0}{(1+H_0^2)^2}$.

Минимум функции определяется из условия $d\left(\frac{\xi_e}{C}\right)/dH = 0$ и достигается при $H = 1/\sqrt{3}$:

$$\left(\frac{\xi_e}{C}\right)_{min} = \left(\frac{16A\sqrt{3}}{9-16A\sqrt{3}}\right)^n. \quad (13)$$

Безразмерное время формовки τ находим, интегрируя уравнение (7) с учетом соотношения (12):

$$\tau = \int_{H_0}^H \frac{2H}{1+H^2} \left[\frac{H - A(1+H^2)^2}{A(1+H^2)^2} \right]^n dH, \quad (14)$$

где $\tau = Ct$.

Рассмотрим случай формовки с постоянной скоростью деформации $\xi = const$; отсюда $d\xi_e = 0$ и $d\sigma_e = 0$. Интегрируя уравнение (8), имеем:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{H}{A(1+H^2)^2}. \quad (15)$$

Максимум p/p_0 при $H = 1/\sqrt{3}$:

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)_{max} = \frac{3\sqrt{3}}{16A}. \quad (16)$$

Подставим значение ξ из (5) в (7), тогда безразмерное время формовки при $\xi = const$ (т.е. $\sigma_e = const$) определим как:

$$\tau = (\sigma_e^{\Pi})^{n_v} \ln \left(\frac{1+H^2}{1+H_0^2} \right), \quad (17)$$

Перепишав выражение (17) относительно H , получим:

$$H = \sqrt{Be^{L\tau} - 1}, \quad (18)$$

где $B = 1 + H_0^2$; $L = (\sigma_e^{\Pi})^{n_v}$.

Из уравнений (15) и (18) получаем зависимость приведенного давления от времени:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\sqrt{Be^{L\tau} - 1}}{H_0 e^{2L\tau}}. \quad (19)$$

Из условия $\frac{d(p/p_0)}{d\tau} = 0$ экстремум функции $p/p_0 = f(\tau)$ будет равен:

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)_{max} = \frac{2\sqrt{2}}{9A}. \quad (20)$$

при

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{4}{3B}\right)}{L}. \quad (21)$$

Графическое изображение зависимостей (12), (14), (15), (18), (19) на рис. 1-5 для материала со значениями реологических параметров $\sigma_0 = 2$ МПа, $\sigma_s = 500$ МПа, $K_v = 200$ МПа·с^m при $C = 2,5$ с⁻¹ и $H_0 = 0,01$ показывают весьма существенное влияние величины m_v на характер течения листовой заготовки. Если $m_v = 1$, формовка оболочек постоянным давлением газа происходит с наименьшим градиентом скоростей деформации при максимально возможных их абсолютных значениях для данного материала, то есть в наиболее благоприятных условиях. Для получения готового изделия по обоим вариантам формовки (при $p = const$ и $\xi = const$) требуется минимум времени. Этим объясняется и наибольший градиент изменения давления во времени в случае формообразования оболочки с постоянной скоростью деформации.

Снижение значения m_v до 0,2 ($n = 5$) приводит не только к уменьшению скоростей деформации заготовки, но и к их существенному различию на стадиях процесса, достигающему шести-восьми порядков. Это исключает возможность проявления в полной мере деформируемым материалом сверхпластичных свойств на всем протяжении формовки, поскольку диапазон оптимальных скоростей сверхпластической деформации не превышает, как правило, двух порядков величин. Время формообразования изделия значительно увеличивается и тем самым процесс становится экономически нецелесообразным.

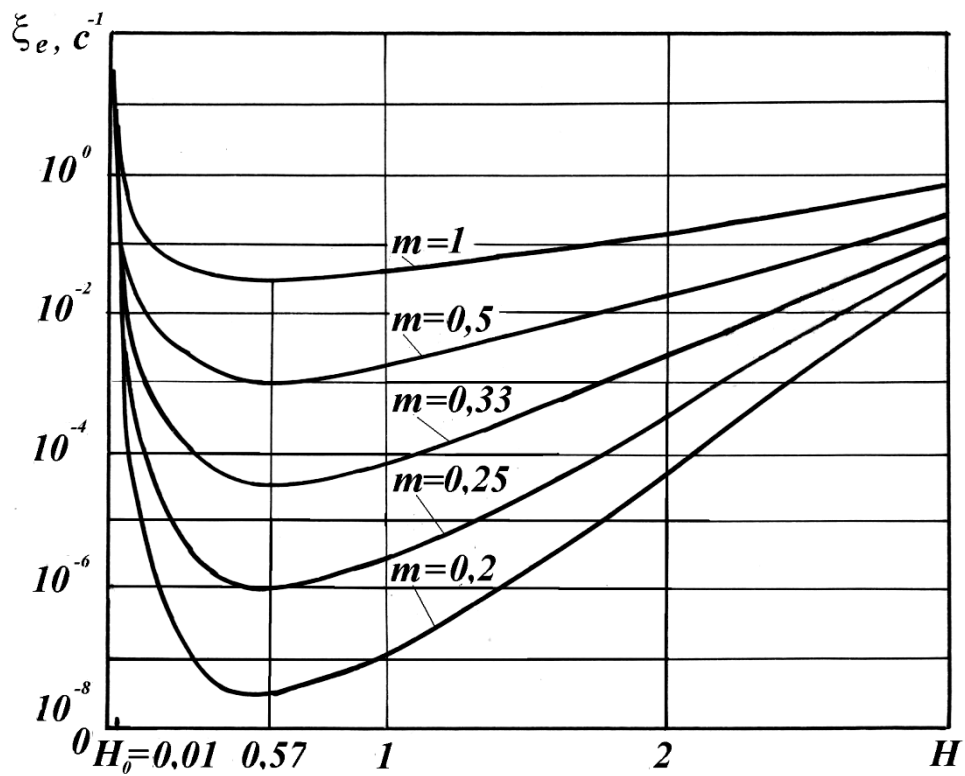


Рис.1- Зависимость расчетной скорости деформации оболочек от их высоты при постоянном давлении и различных значениях параметра m_v .

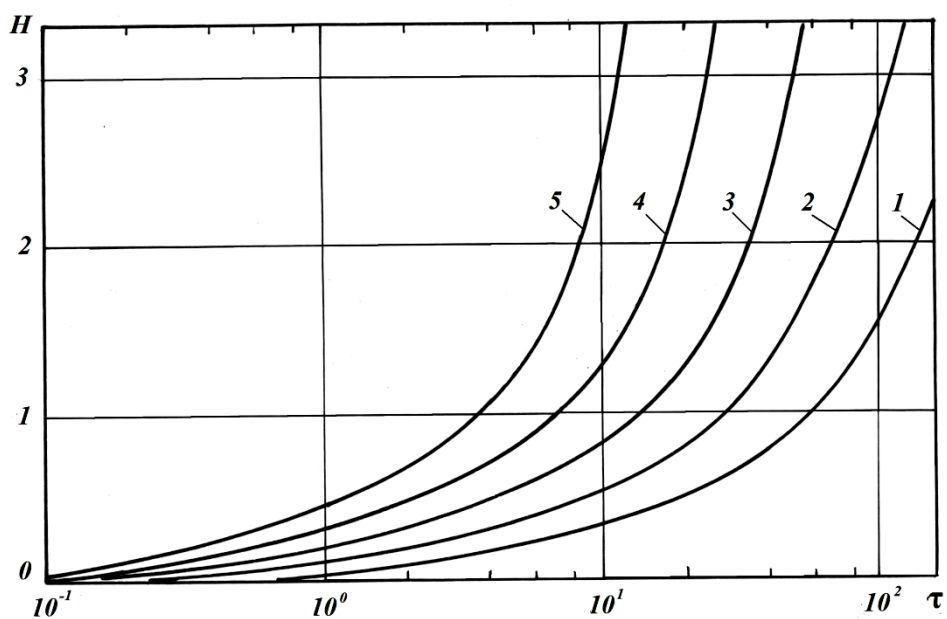


Рис.2- Расчетные значения изменения высоты оболочки во времени при постоянном давлении и различных значениях m_v :

1, 2, 3, 4, 5 – $m_v = 0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 1,0$.

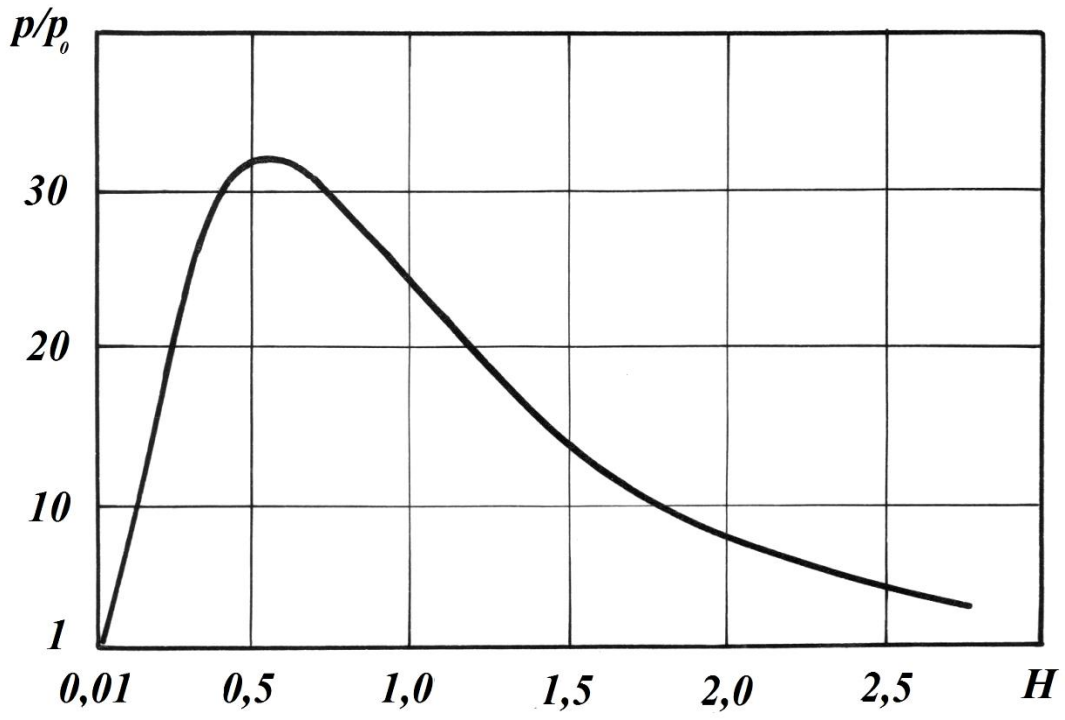


Рис.3- Расчетная зависимость изменения давления формовки от высоты оболочки при постоянной скорости деформации.

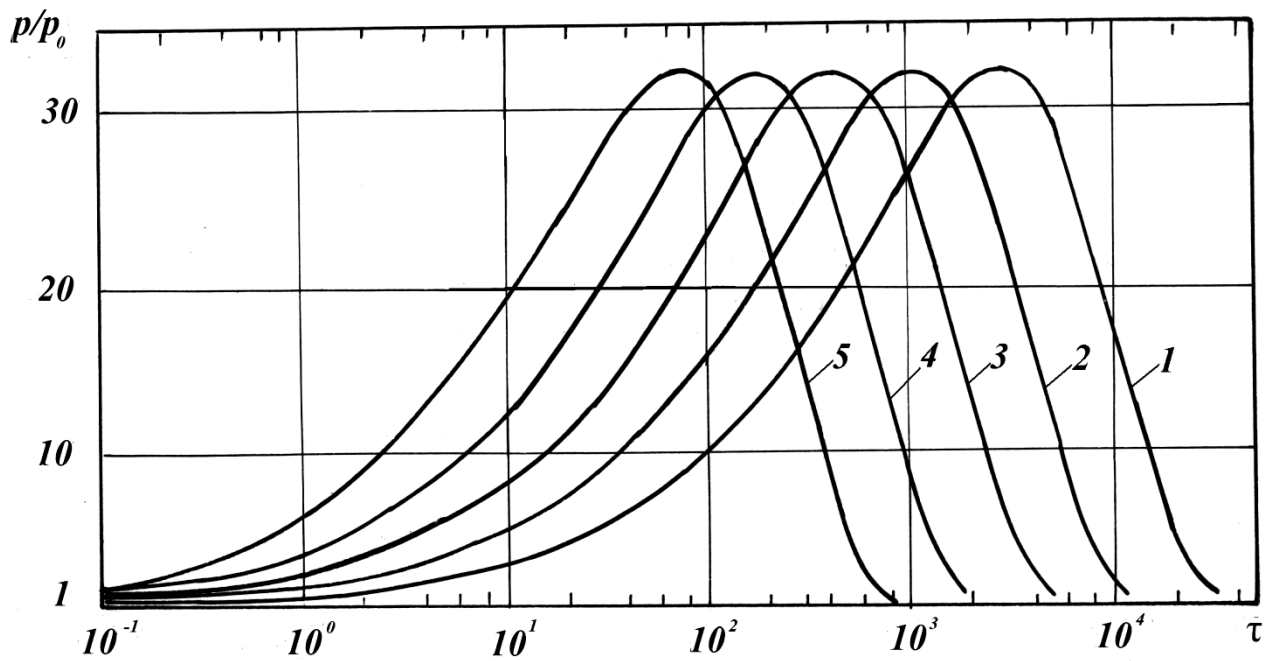


Рис.4- Расчетная зависимость изменения давления во времени при формовке с постоянной скоростью деформации, равной 10^{-2} c^{-1} и различных значениях параметра m_v :

1, 2, 3, 4, 5 – $m_v = 0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 1,0$.

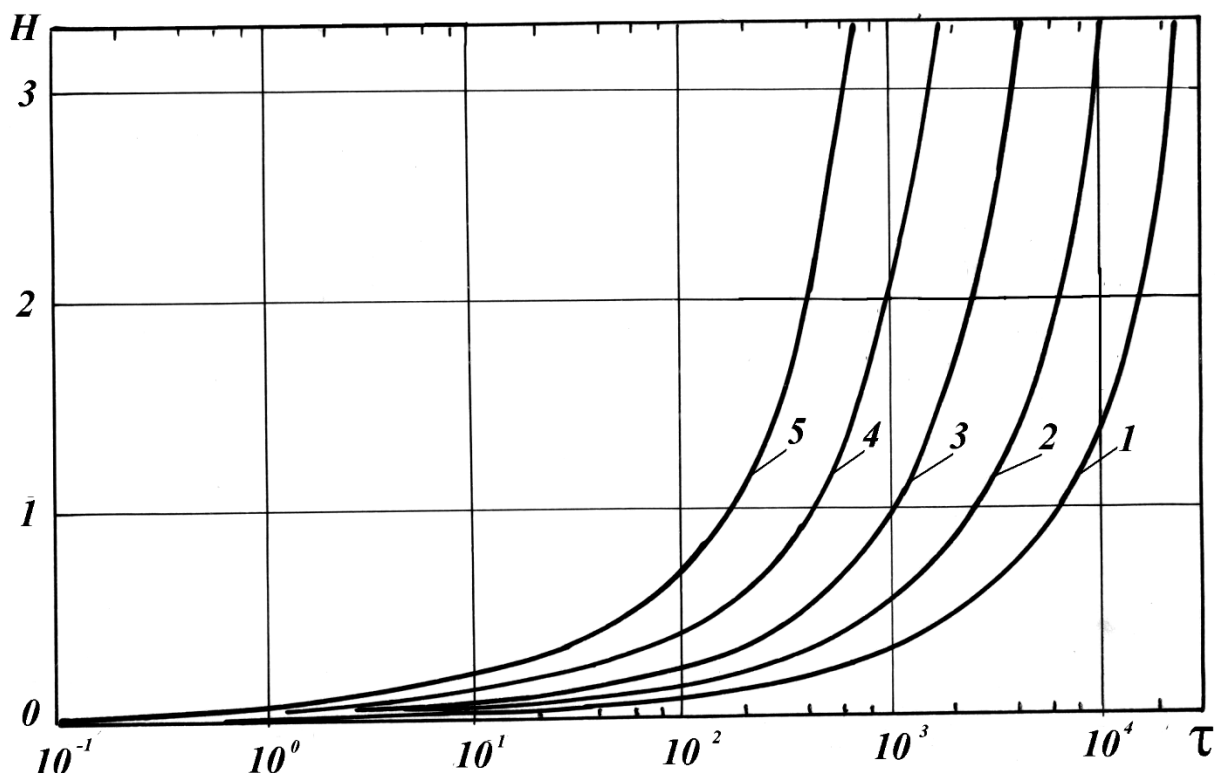


Рис.5- Расчетная зависимость изменения высоты оболочки во времени при формовке с постоянной скоростью деформации и различных значениях параметра m_v :

1, 2, 3, 4, 5 – $m_v = 0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 1,0$.

Выводы

Приведенный анализ с использованием уравнения *EVP*-среды позволяет достаточно просто описывать формоизменение в состоянии сверхпластичности листовой заготовки под действием давления газовой среды. Полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии реологического состояния материала на его поведение в процессе деформации.

Список использованных источников:

1. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов.- М.: Машиностроение, 1979.- 186 с.
2. Jovane F. An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm: theory and experiments / F. Jovane //Int. J. Mech. Science, 1968, v.10, N6, P.409-427.
3. Cornfield G.C. The forming of superplastic sheet metal / G.C. Cornfield, W.H. Johnson // Int. J. Mech. Science, 1970, v.12, N6, P.479-490.

4. Holt D.L. An analysis of the bulging of a superplastic sheet by lateral pressure / D.L. Holt // Int. J. Mech. Science, 1970, v.12, N6, P.491-497.
5. Belk J.A. A quantitative model of the blow-forming sheet / J.A. Belk // Int. J. Mech. Science, 1975, v.17, N8, P.505 -511.
6. Панченко Е.В. Определение технологических параметров пневмоформовки деталей в условиях сверхпластичности / Е.В. Панченко, И.П. Ренне // Кузнечно-штамповочное производство, 1978, №12, С.15-17.
7. Ренне И.П. Определение параметров уравнения сверхпластического состояния листовых материалов из опыта на двухосное растяжение / И.П. Ренне, Е.В. Панченко // Проблемы прочности, 1978, №8, С.31-35.