

## ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В МАТРИЦУ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Леонова Е.В., Ларин С.Н.

ГОУ ВПО «ТулГУ»

Кафедра «Механика пластического формоизменения»

Научный руководитель: д.т.н., проф. Яковлев С.П.

*Установлено влияние технологических параметров на напряженное и деформированное состояния заготовки, геометрические размеры изготавливаемой детали и предельные возможности формообразования.*

Рассмотрено деформирование тонкой листовой заготовки, обладающей плоскостной анизотропией механических свойств, в матрицу квадратного поперечного сечения со сторонами  $2a$  в режиме ползучести под действием гидростатического давления  $p = p_0 + a_p t^{n_p}$ , где  $p_0, a_p, n_p$  - константы нагружения;  $t$  - время деформирования. Заготовка закреплена по внешнему контуру (рис. 1). Упругими составляющими деформации пренебрегаем. Вводится потенциал скоростей деформации анизотропного тела и ассоциированный закон течения.

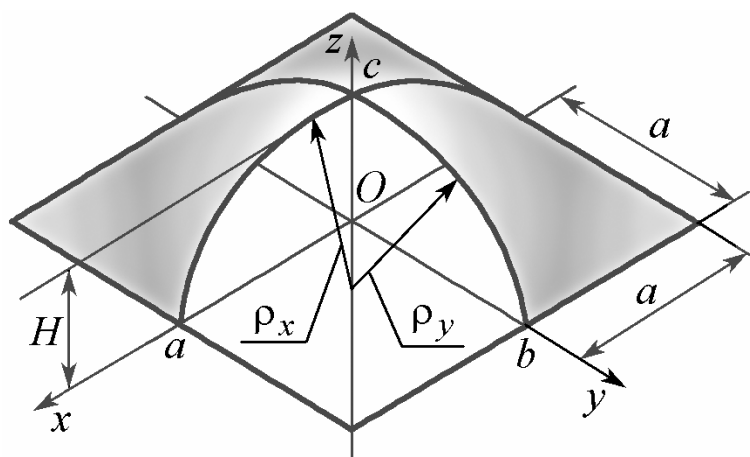


Рис. 1. Схема формообразования квадратной ячейки

Рассмотрено медленное изотермическое деформирование в режиме вязкого течения ( $\sigma_e \leq \sigma_{e0}$ ) материала, для которого справедливы уравнения энергетической теории ползучести и повреждаемости

$$\xi_e = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n / (1 - \omega_A)^m; \quad \dot{\omega}_A = \sigma_e \xi_e / A_{np},$$

где  $\sigma_e$  и  $\xi_e$  - эквивалентное напряжение и эквивалентная скорость деформации;  $B, n, m$ , - константы материала, зависящие от температуры испытаний;  $A_{np}$  - удельная работа разрушения при вязком течении материала;  $\omega_A$  - повреждаемость материала при вязкой деформации по энергетической модели разрушения соответственно;  $\sigma_{e0}$  - произвольно выбранная величина эквивалентного напряжения;  $\dot{\omega}_A = d\omega_A / dt$ ;

$$A_{np}^c = D(b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma),$$

$D, b_0, b_1, b_3$  - константы материала;  $\alpha, \beta, \gamma$  - углы ориентации первой главной оси напряжений  $\sigma_1$  относительно главных осей анизотропии  $x, y$  и  $z$  соответственно.

Принимаем, что напряженное состояние заготовки плоское ( $\sigma_z = 0$ ). Радиусы кривизны окружностей в плоскостях  $xOz$  и  $xOy$  равны

$$\rho_x = \rho_y = \frac{H^2 + a^2}{2H}.$$

Допускаем, что траектории точек ортогональны в данный момент образуемому профилю. В этом случае в полюсе срединной поверхности (точка "с") скорости деформаций будут определяться по формулам:

$$\xi_{yc}^c = \xi_{xc}^c = \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}; \quad \xi_{zc}^c = \frac{\dot{h}}{h},$$

где  $\dot{H} = dH/dt$ ;  $\dot{h} = dh/dt$ .

Так как мембрана закреплена по внешнему контуру, то в точках "а" и "б" с координатами  $x=a, y=0$  и  $x=0, y=a$  соответственно имеем

$$\xi_{ya}^c = 0; \quad \sigma_{ya} = \frac{H\sigma_{xa}}{F+H} = \frac{R_y\sigma_{xa}}{1+R_y}; \quad \xi_{xa}^c = -\xi_{za}^c,$$

и

$$\xi_{xb}^c = 0; \quad \sigma_{xb} = \frac{H\sigma_{yb}}{H+G} = \frac{R_x\sigma_{yb}}{1+R_x}; \quad \xi_{yb}^c = -\xi_{zb}^c,$$

где  $R_x$  и  $R_y$  - коэффициенты анизотропии листовой заготовки.

Примем для простоты анализа, что в каждый момент деформации в сечении оболочки  $xOz$  скорость деформации  $\xi_y^c$  от купола к стороне  $x=a$  вдоль оси  $x$  изменяется по линейному закону от максимальной величины в вершине купола до нуля в точке  $x=a$ , а величина скорости деформации  $\xi_x^c$  постоянна по величине. Аналогичное предположение имеет место в сечении  $yOz$  относительно скоростей деформации  $\xi_x^c$  и  $\xi_y^c$ .

Величина толщины заготовки в точках «с», «а» и «б» может быть определена по выражениям:

$$h_c = h_0 \left[ \frac{a^2}{H^2 + a^2} \right]^2; \quad h_a = h_b = h_0 \frac{a^2}{H^2 + a^2},$$

где  $h_0$  - начальная толщина мембраны.

Принимая, что напряжения равномерно распределены по толщине, компоненты напряжений определим из совместного решения уравнения равновесия безмоментной оболочки, нагруженной равномерным давлением  $p$

$$\frac{\sigma_y}{\rho_y} + \frac{\sigma_x}{\rho_x} = \frac{p}{h}.$$

и отношение скоростей деформаций  $\xi_{xc}^c$  и  $\xi_{yc}^c$  в точке купола заготовки «с» из ассоциированного закона течения [3]

$$\frac{\xi_{xc}^c}{\xi_{yc}^c} = \frac{R_y R_x (\sigma_x - \sigma_y) + R_y \sigma_x}{R_x \sigma_y + R_x R_y (\sigma_y - \sigma_x)}.$$

Окончательно будем иметь

$$\sigma_{xc} = \chi \sigma_{yc}; \quad \sigma_{yc} = \frac{p R_y}{h(1+\chi)}; \quad \chi = \frac{R_x(1+R_y) + R_x R_y}{R_y(1+R_x) + R_x R_y}.$$

В случае плоского напряженного состояния эквивалентная скорость деформации  $\xi_e$  и напряжения  $\sigma_e$  вычисляются по известным соотношениям [3].

Получим уравнения для определения давления  $p$ . Поскольку величина давления  $p$  в каждый момент деформирования равномерно распределена по поверхности оболочки, то будем определять его величину в полюсе сферы (точка "с").

Учитывая, что в полюсе (центре симметрии заготовки)

$$\xi_{xc}^c = \xi_{yc}^c,$$

выражение для определения эквивалентной скорости деформации  $\xi_e$  в точке "с" может быть представлено в виде:

$$\xi_{ec} = C_1 \xi_{yc}^c = C_1 \frac{2H\dot{H}}{(H^2 + a^2)},$$

где

$$C_1 = \sqrt{\frac{2(R_x + R_x R_y + R_y)}{3 R_x R_y (R_x + R_y + 1)}} \{R_x(R_y + 1) + 2R_x R_y + R_y(R_x + 1)\}^{1/2}.$$

Величина эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  в точке "с" оценивается по выражению

$$\sigma_{ec} = D_1 \sigma_{yc}, \quad D_1 = \left\{ \frac{3 R_y (R_x + 1) \chi^2 - 2 R_x R_y \chi + R_x (R_y + 1)}{2 (R_x + R_x R_y + R_y)} \right\}^{1/2}.$$

Из уравнения состояния материала с учетом величин  $\sigma_e, \xi_e$  получим

$$p^n dt = \frac{C_1 (\sigma_{e0})^n (1 - \omega_A^c)^m 2^{2n+1} h_0^n a^{4n} (1 + \chi) H^{n+1} dH}{B D_1^n (H^2 + a^2)^{3n+1}}.$$

Второе уравнение состояния позволяет найти выражение для определения величины повреждаемости

$$\dot{\omega}_{Ac}^c = \frac{D_1 C_1 (H^2 + a^2)^2 p}{h_0 a^4 (1 + \chi) A_{npc}^c} \dot{H}.$$

Аналогичным образом могут быть получены основные уравнения и соотношения для решения поставленной задачи в предположении, что поведение материала подчиняется уравнениям кинетической теории ползучести и повреждаемости, при известном законе давления от времени.

Проанализируем вторую стадию деформирования. Рассмотрим формирование углового элемента оболочки в плоскостях симметрии  $yOz$  и  $xOz$ . Считаем, что  $a > H_1$ . Предполагаем, что нам известны давление  $p_1$ , высота оболочки  $H_1$ , накопленная повреждаемость  $\omega_0$  и распределение толщины оболочки  $h_1 = h_1(\varphi)$  в момент  $t = t_1$ , где  $\varphi$  - угол, характеризующий положение точки на угловом элементе заготовки. Будем счи-

тать, что процесс формообразования угловых элементов конструкций осуществляется в соответствии с рис. 2.

Предлагается следующая схема деформирования оболочки на второй стадии деформирования при  $t > t_1$ . После контакта вершины купола с обшивкой предполагается, что реализуется равномерное деформированное состояние, т.е. толщина оболочки меняется равномерно в каждой точке оболочки от начальных размеров при  $t = t_1$ , а форма деформируемой угловой части оболочки в плоскостях  $xOz$  и  $yOz$  сохраняет форму части окружности.

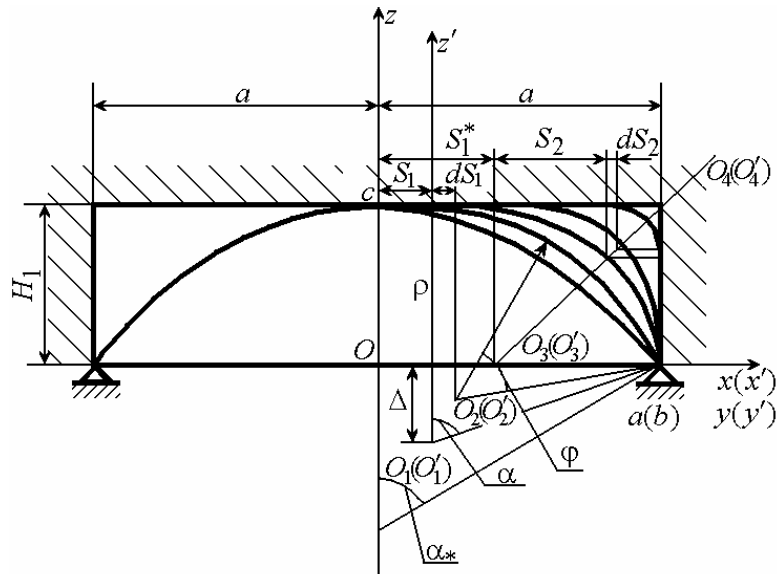


Рис. 2. Формообразование угловых элементов в плоскостях  $yOz$  и  $xOz$

На первом этапе второй стадии деформирования в плоскостях  $yOz$  и  $xOz$  формируется плоский участок в окрестности вершины купола до момента, когда  $S_1 = S_{1*} = a - H_1$ . В дальнейшем на втором этапе второй стадии происходит симметричное деформирование оболочки относительно новых осей симметрии  $O_3O_4$  и  $O'_3O'_4$  с образованием симметрично плоских участков в угловой части оболочки; при этом форма деформируемой свободной угловой части в указанных выше плоскостях имеет форму части окружности (рис. 2).

Разработаны необходимые уравнения и соотношения для теоретического анализа напряженного и деформированного состояния заготовки при формообразовании угловых элементов конструкции.

Аналогичным образом получены основные соотношения для теоретического анализа процесса изотермического деформирования в режиме вязкого течения ( $\sigma_e \leq \sigma_{e0}$ ) материала, для которого справедливы уравнения кинетической теории ползучести и повреждаемости

$$\xi_e = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n / (1 - \omega_e)^m; \dot{\omega}_e = \xi_e / \varepsilon_{enp}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{enp}$  - предельная эквивалентная деформация при вязком течении материала;  $\omega_e$  - повреждаемость материала при вязкой деформации по кинетической модели разруше-

ния соответственно;  $\dot{\omega}_e = d\omega_e/dt$ ;  $\varepsilon_{enp} = D'(b'_0 + b'_1 \cos \alpha + b'_2 \cos \beta + b'_3 \cos \gamma)$ ,  $D'$ ,  $b'_0$ ,  $b'_1$ ,  $b'_3$  - константы материала.

Расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМг6 при температуре обработки  $T = 450^\circ C$ , поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, и для титанового сплава ВТ14 при температуре  $T = 950^\circ C$ , поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости. Механические характеристики этих материалов при формоизменении в условиях вязкого течения материала приведены в работе [1].

Графические зависимости изменения относительных величин толщины заготовки в куполе  $\bar{h}_c = h_c/h_0$  и в месте ее закрепления  $\bar{h}_a = h_a/h_0$ , высоты заготовки  $\bar{H} = H/h_0$  ( $h_0 = 1$  мм) и максимальной величины накопленной повреждаемости  $\omega_A$  (в куполе заготовки) от времени деформирования  $t$  для титанового сплава ВТ6 ( $T = 930^\circ C$ ), поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости, при заданном законе нагружения представлены на рис. 3. Точками обозначены результаты экспериментальных исследований [1].

Из анализа графических зависимостей следует, что с ростом времени деформирования  $t$  до определенного предела осуществляется резкое увеличение относительной высоты заготовки  $\bar{H}$  и уменьшение относительной толщины заготовки в куполе  $\bar{h}_c$  и в месте ее закрепления  $\bar{h}_a$ . В момент времени  $t$ , близком к разрушению заготовки, происходит резкое изменение относительных величин  $\bar{H}$ ,  $\bar{h}_c$  и  $\bar{h}_a$ . Это связано с интенсивным ростом накопления микроповреждений в заключительной стадии процесса.

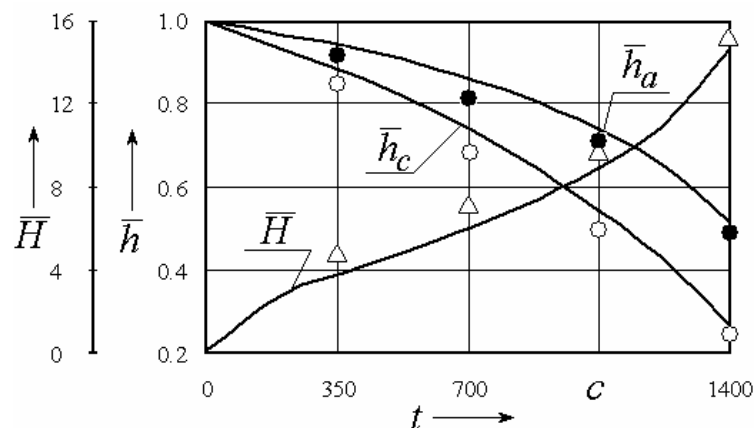


Рис. 3. Зависимости изменения величин  $\bar{H}$ ,  $\bar{h}$  и  $\omega_A$  в рассматриваемых точках от времени деформирования  $t$  для титанового сплава ВТ6

$$(T = 930^\circ C; a_p = 0,08 \text{ МПа} / c^{n_p}; n_p = 0,5; a = 15 \text{ мм})$$

Показано, что изменение относительной толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_c$  происходит более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в месте ее закрепления  $\bar{h}_a$ . С ростом времени деформирования  $t$  эта разница увеличивается и может достигать 30 %. Сопоставление результатов расчетов с результатами экспери-

ментальных исследований по геометрическим размерам на этапах деформирования при заданном законе нагружения указывает на удовлетворительное их согласование.

Предельные возможности формоизменения в процессах изотермической пневмоформовки оценивались на базе феноменологических моделей разрушения в зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия по уровню повреждаемости, который не должен превышать 1, т.е.  $\omega \leq 1$ .

При исследовании установлены зависимости изменения относительных величин толщины заготовки в вершине мембраны  $\bar{h}_{c*} = h_{c*}/h_0$  и в точках защемления  $\bar{h}_{a*} = h_{a*}/h_0$ , высоты заготовки  $\bar{H}_* = H_*/h_0$  в момент разрушения заготовки, предельного времени деформирования  $t_*$  от параметров закона нагружения ( $a_p, n_p$ ) для алюминиевого сплава АМг6 ( $a = 25$  мм). Предельные возможности свободной пневмоформовки квадратной мембраны ограничиваются феноменологическим критерием по накоплению микроповреждений ( $\omega_A^c = 1$ ) в зависимости от условий деформирования. Анализ результатов расчетов показывает, что увеличение параметров закона нагружения  $a_p, n_p$  приводит к уменьшению времени разрушения  $t_*$  и относительной высоты заготовки  $\bar{H}_*$ , а также – к увеличению относительной толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_{c*}$ . Установлено, что для исследуемых материалов при условиях нагружения ( $a_p, n_p$ ), исследуемых в работе, разрушение оболочки по критерию накопления повреждений происходит в куполе заготовки (точка “с”).

Предельные возможности формоизменения в режиме вязкого течения материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, не зависят от условий нагружения заготовки. Показана существенная зависимость времени разрушения  $t_*$  от параметров нагружения  $a_p$  и  $n_p$ .

Графические зависимости изменения коэффициента заполнения  $\delta_F = F/F_0$  и максимальной величины накопленных микроповреждений  $\omega_A$  от времени деформирования  $t$  представлены на рис. 4. Здесь  $F$  и  $F_0$  - текущая и полная площадь верхней части матрицы. Расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМг6 для ячейки  $a = 15$  мм,  $h_0 = 1$  мм при  $a_p = 0,06 \text{ МПа} / \text{с}^{n_p}$ ,  $n_p = 0,4$ .

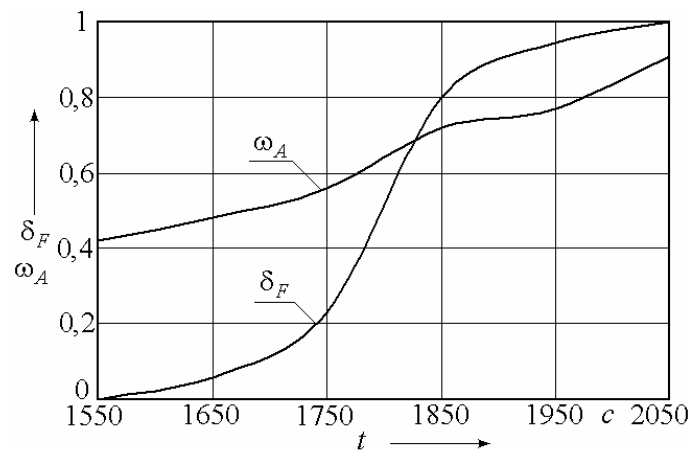


Рис. 4. Графические зависимости изменения  $\delta_F$  и  $\omega_A$  от  $t$

Анализ графических зависимостей показывает, что процесс заполнения угловых элементов условно можно разделить на три стадии: стадия плавного увеличения величины  $\delta_F$ , последующая стадия интенсивного его роста и стадию плавного увеличения величины  $\delta_F$ .

В работе также проанализированы зависимости относительных предельных величин радиуса закругления углового элемента оболочки  $\bar{r}_* = r_* / h_0$  и времени разрушения  $t_*$  от параметров закона нагружения  $a_p$  и  $n_p$  для алюминиевого сплава АМгб ( $T = 450^\circ C$ ). Показано, что с ростом параметров закона нагружения  $n_p$  и  $a_p$  наблюдается увеличение относительной величины критического радиуса закругления  $\bar{r}_*$ . Установлено, с увеличением параметров нагружения  $n_p$  и  $a_p$  время разрушения  $t_*$  существенно уменьшается. Показано, что для материалов, подчиняющихся кинетической теории ползучести и повреждаемости, например титановый сплав ВТ6 ( $T = 930^\circ C$ ), относительный критический радиус закругления  $\bar{r}_*$  не изменяется, а время разрушение уменьшается с ростом параметров нагружения  $n_p$  и  $a_p$ .

### **Выводы**

Результаты моделирования процесса изотермического деформирования листовых анизотропных заготовок в матрицу квадратного поперечного сечения показывают удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных данных по силовым режимам и предельным возможностям формообразования (до 10 %).

### **Литература**

1. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев [и др.]. – М: Машиностроение-1, 2004. – 427 с.
2. Механика процессов изотермического формоизменения элементов многослойных листовых конструкций / С.П. Яковлев [и др.]. - Тула: ТулГУ, 2001. – 254 с.
3. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. - Кишинев: Квант, 1997. - 332 с.