КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
Труды, вып. 41, 1970 г.
Вопросы технологии производства летательных аппаратов

В. В. УВАРОВ, Ю. М. АРЫШЕНСКИЙ, И. И. КАЛУЖСКИЙ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ ВЫТЯЖКИ

Для изготовления деталей операциями глубокой вытяжки применяются разнообразные листовые материалы, обладающие анизотропией свойств как в плоскости листа, так и в направлении толщины. Анизотропия материала оказывает существенное влияние на техпроцесс глубокой вытяжки, вызывая не только образование фестонов (ушек) на изделии, но и в значительной мере влияет на величину предельного коэффициента вытяжки. Последнее подтверждается рядом экспериментальных работ [5,] [4].

Представляет интерес теоретический анализ влияния анизотропи и на предельный коэффициент вытяжки с учетом реальных условий процесса (упрочнения материала, трения и т д.).

Степень анизотропии материала для рассматриваемого случая можно охарактеризовать величиной среднего коэффициента поперечной деформации

$$\mu_{ср} = \frac{\left(\frac{\mu_{ек}^{0} + \mu_{ек}^{90}}{2}\right) + \mu_{ек}^{45^\circ} + \mu_{ек}^{22,5^\circ} + \mu_{ек}^{67,5^\circ}}{n},$$

где $\mu_{ек}$ — коэффициент поперечной деформации при линейном растяжении образца под различными углами α к направлению прокатки. Индекс к показывает направление поперечного сжатия по ширине, а e — направление действия силы;

n — количество углов α (не считая 0 и 90°), в направлении которых испытаны образцы.

Обычно принято оценивать средний показатель анизотропии либо по трем направлениям $\alpha=0—45°—90°$, либо по пяти $\alpha=0—22{,}5°—45°—67{,}5°—90$ [4].

В результате осреднения материал при $0{,}5>\mu_{ср}>0{,}5$ можно считать трансверсально-изотропным, т. е. свойства в плоскости листа по всем направлениям являются как бы одинаковыми, но отличаются от свойств в направлении толщины.

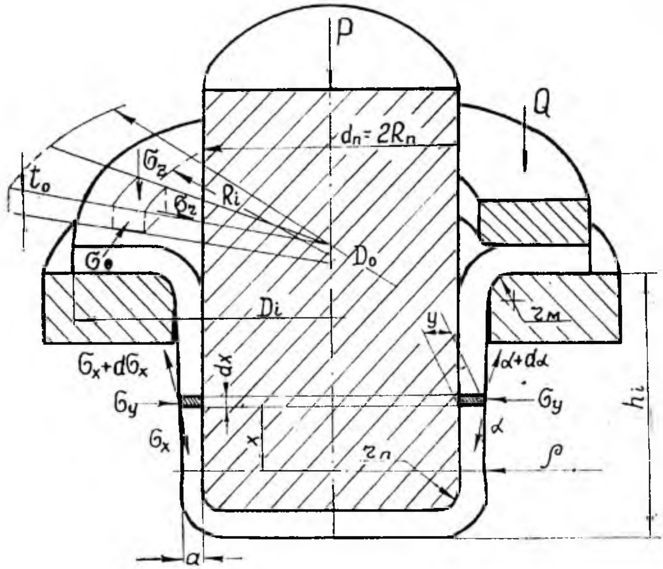

Рис. 1. Принципиальная схема вытяжки цилиндрической детали

При $\mu_{ср}=0{,}5$ имеем случай изотропного материала.

Для анализа влияния анизотропии на предельный коэффициент вытяжки воспользуемся известным положением о том, что максимальное осевое усилие, возникающее при свертке фланца P'_{max}, не превышает усилия, вызывающего разрыв в наиболее опасном месте вытянутого участка изделия P''_{max}. При предельном коэффициенте вытяжки $m_{пред}= \dfrac{D_{изд}}{D_0}$ имеем равенство $P'_{max}=P''_{max}$. Наиболее опасным местом при вытяжке является участок перехода стенки цилиндра в радиус данного закругления (рис. 1). Примем в этом месте схему плоской деформации $\varepsilon_2=0$ (отсутствует тангенциальная деформация).

Для нахождения эффективного растягивающего напряжения в наиболее опасном месте (шейке) воспользуемся методом совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности при определенных граничных условиях. Используя основные положения работы [3], условие пластичности трансверсально-изотропного материала в случае плоской деформации, можно записать следующее:

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \frac{\sigma_{i1}}{\sqrt{1 - \mu_{cp}^2}}, \tag{2}$$

где σ_1, σ_3 — главные напряжения, возникающие в шейке.

σ_{i1} — интенсивность напряжений в направлении «1».

Уравнение равновесия выделенного элемента (рис. 1) при граничных условиях

$$\left(\frac{dy}{dx}, \quad y = a, \quad d\sigma_x = 0, \quad \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{\rho}, \quad \sigma_y = \sigma_3, \quad \sigma_x = \sigma_1 = q_0\right)$$

имеет вид:

$$\sigma_3 = -\sigma_1 \frac{(2R_n + a)\,a}{2\rho \cdot 2\,(R_n + a)}, \tag{3}$$

где R_n — радиус пуансона;

a — толщина изделия в шейке;

ρ — радиус кривизны в шейке.

Обычно в реальных процессах вытяжки отношение $\frac{2R_n}{t_0}$, а следовательно, и $\frac{2R_n}{a}$ — весьма велико (более 20), поэтому можно принять, что величина $\frac{2R_n + a}{2\,(R + a)} \approx 1$.

Выражение (3) в этом случае составляет:

$$\sigma_3 = -\sigma_1 \frac{a}{2\rho}. \tag{4}$$

Решая совместно уравнения (2) и (4), получим:

$$\sigma_1 = q_0 = \frac{\sigma_{i1}}{\sqrt{1 - \mu_{cp}^2}\left(1 + \frac{a}{2\rho}\right)}. \tag{5}$$

Максимальное усилие P''_{max}, соответствующее моменту потери устойчивости и началу разрушения, будет составлять:

$$P''_{max} = \frac{\sigma_в F_0}{\sqrt{1 - \mu_{cp}^2}\left(1 + \frac{a}{2\rho}\right)}. \tag{6}$$

Толщина стенки в шейке a пренебрежимо мала по отношению к радиусу профиля шейки ρ. Поэтому величина $1 + \frac{a}{2\rho}$ близка к единице и

$$P''_{max} = \frac{\sigma_в F_0}{\sqrt{1 - \mu_{cp}^2}}, \tag{7}$$

где $\sigma_в$ — временное сопротивление разрыву;

F_0 — первоначальная площадь сечения изделия.

В случае изотропного материала $\mu_{cp}=0{,}5$ имеем известное соотношение:

$$P'_{max} = 1{,}15\sigma_в F_0. \tag{8}$$

Максимальное усилие P'_{max} можно определить по формуле:

$$P'_{max} = p_1 \cdot F_0,$$

а p_1 — максимальное удельное давление при свертке фланца—находится из выражения

$$p_1 = (\sigma_r + \sigma_{тр})(1 + 1{,}6f) + \sigma_u,$$

где σ_r — радиальные, растягивающие напряжения, непосредственно связанные с сопротивлением металла деформированию;

$\sigma_{тр}$ — удельное сопротивление трения от силы прижима Q;

f — коэффициент трения;

σ_u — удельное сопротивление от изгиба на входной кромке матрицы.

На основании анализа, проведенного Л. А. Шофманом [1], экстремальные значения σ_r могут быть определены из выражения:

$$\sigma_r = \varphi_1 \left(\frac{1}{m_{пред}} - \varphi'_1 \right) \sigma_в \alpha',$$

где $\sigma_в$, φ_1, φ'_1 — константы деформируемого металла;

$\alpha' = \frac{\beta_{cp}}{1{,}1}$ — коэффициент, учитывающий влияние анизотропии.

$$\beta_{cp} = \sqrt{\frac{2}{1-\mu_{cp}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{2} + \sqrt{1-\mu_{cp}}}{\sqrt{1+\mu_{cp}}}. \tag{9}$$

Значение $\sigma_{тр}$ может быть выражено через величину радиальных растягивающих напряжений, если принять положение И. А. Норицына о том, что радиальное усилие прижима равно $\approx 0{,}25$ от усилия вытяжки [2]. В этом случае величина P'_{max} составляет:

$$P'_{max} = \sigma_в F_0 \left[\varphi_1 \left(\frac{1}{m_{пред}} - \varphi'_1 \right) \alpha' \eta + \frac{t_0}{2r_м + t_0} \right], \tag{10}$$

где η — коэффициент, учитывающий влияние трения на прижиме и радиусе матрицы.

$$\eta = \frac{2(1 + 1{,}6f)}{2 - f(1 + 1{,}6f)}; \tag{11}$$

$r_м$ — радиус закругления матрицы;

t_0 — толщина заготовки.

Приравнивая выражение (10) и (6) и решая полученное уравнение относительно $K_{пред}$ имеем:

$$K_{пред} = \frac{1}{m_{пред}} \left(\frac{1}{\sqrt{1-\mu_{cp}^2}} - \frac{t_0}{2r_м + t_0} \right) \frac{1}{\varphi'_1 \alpha_2 \eta} - \varphi'_1. \tag{12}$$

На графике (рис. 2) приведены зависимости величины предельной вытяжки $K_{пред}$ от степени анизотропии и коэффициента трения для материалов с равномерным сужением $\Psi_р \approx 15 \div 25\%$.

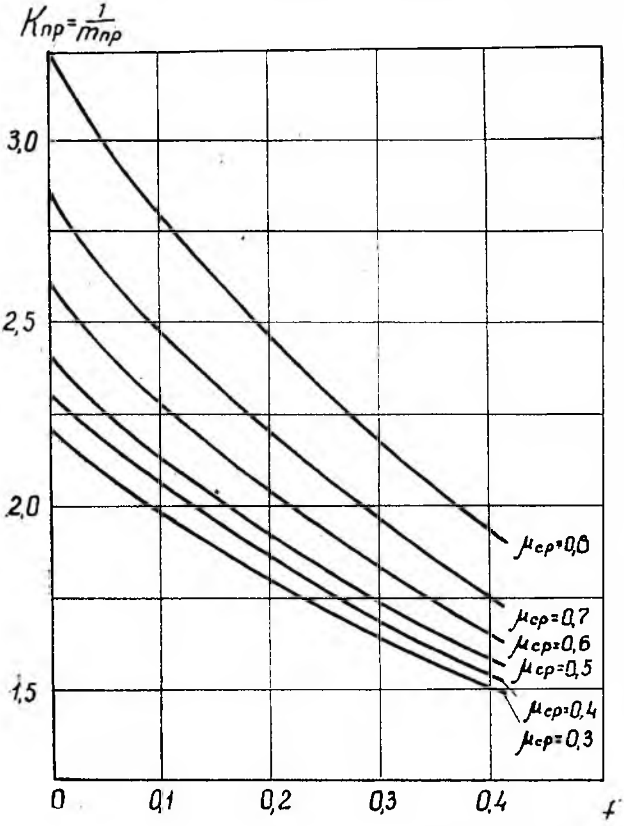

Рис. 2. Зависимость величины предельной вытяжки от анизотропии и коэффициента трения

Из графика видно, что материалы, имеющие $\mu_{ср} > 0,5$, обладают большей способностью к вытяжке, чем материалы с $\mu_{ср} < 0,5$. Однако положительное влияние анизотропии может быть сведено на нет трением, возникающим при вытяжке. Отметим так же, что уменьшение трения особенно эффективно для материалов с высокими значениями $\mu_{ср}$. Этим можно объяснить поведение некоторых листовых материалов при операциях глубокой вытяжки. Например, у титановых сплавов с $\mu_{ср} \approx 0,8$ при смазке полиэтиленом $K_{пред} = 3,0$ [5]. В производственных условиях, где отмечается даже налипание металла на матрицу (при очень больших значениях коэффициента трения) величина $K_{пред} \approx 1,8 \div 2,0$ [6].

Для подтверждения теоретических зависимостей авторы использовались также результатами экспериментов [4], [5] по определению предельной вытяжки ряда листовых материалов с различной степенью анизотропии (рис. 3). На графике видно довольно точное совпадение теоретических зависимостей и экспериментальных данных.

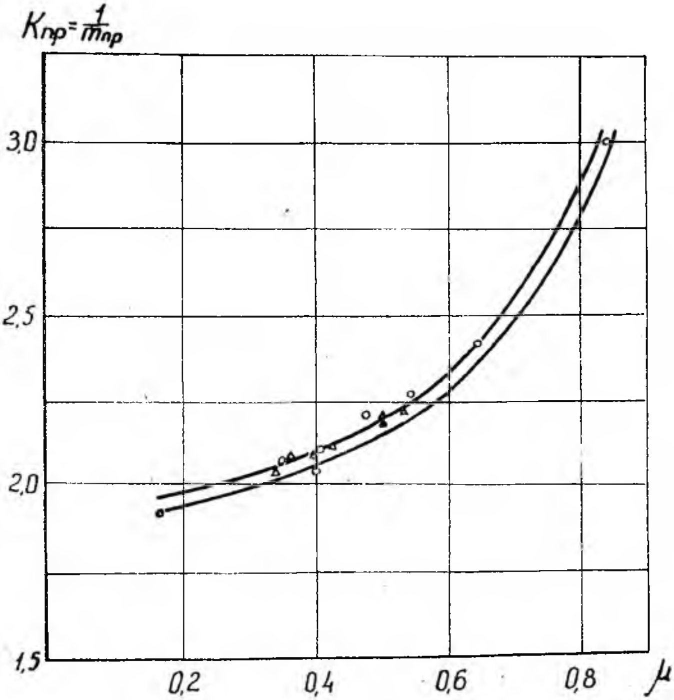

Рис. 3. Сопоставление теоретической зависимости $K_{пред}$ от $\mu_{ср}$ (сплошные линии) с результатами экспериментов при $f=0{,}08\div0{,}10$

В заключение отметим, что полученная зависимость $K_{пред}$ от величины анизотропии, трения, свойств материала позволяет более правильно анализировать и проектировать техпроцессы глубокой вытяжки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Шофман. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. Машиностроение, 1964.
2. И. А. Норицын. Исследование глубокой вытяжки листового металла на первой и последующих операциях. Труды Московского вечернего машиностроительного института. Выпуск II, изд-во «Советская наука», 1955.
3. И. И. Калужский, Ю. М. Арышенский, В. В. Уваров. Некоторые вопросы пластичности анизотропных сред. Тезисы докладов научно-тех-

нической конференции, Куйбышевский авиационный институт, 1967.
4. Wilson D. V., Butler R. D. The role of cup-drawing tests in measuring drawability. j. Jnst. Metals, № 12, 1962.
5. Wilson D. V. Plastic anisotropy in sheel metals. j Jnst. Metals, № 3 1966.
6. Л. А. Никольский. Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов. Машиностроение, 1964.