УДК 621.983; 539.374

ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дериева А.Н., Агеева А.И.
ГОУ ВПО «ТулГУ»
Кафедра «Механика пластического формоизменения»
Научный руководитель: д.т.н., проф.. Яковлев С.П.

Установлено влияние технологических параметров и анизотропии механических свойств заготовки на силовые режимы и предельные возможности вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок.

Рассмотрена операция вытяжки с утонением стенки осесимметричной толстостенной цилиндрической заготовки. Материал заготовки жесткопластический, обладает цилиндрической анизотропией механических свойств [1]. Течение материала принимается осесимметричным. Анализ процесса вытяжки с утонением стенки реализуется в цилиндрической системе координат. Схема к анализу вытяжки с утонением стенки приведена на рис. 1. Течение материала принимается установившимся. Принимаем, что условия трения на контактной поверхности инструмента с заготовкой подчиняется закону Кулона

$$\tau_M = \mu_M \sigma_{nM}\,; \quad \tau_\Pi = \mu_\Pi \sigma_{n\Pi}\,,$$

где μ_M и μ_Π - коэффициенты трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона; σ_{nM} и $\sigma_{n\Pi}$ - нормальные напряжения на контактных поверхностях матрицы и пуансона соответственно.

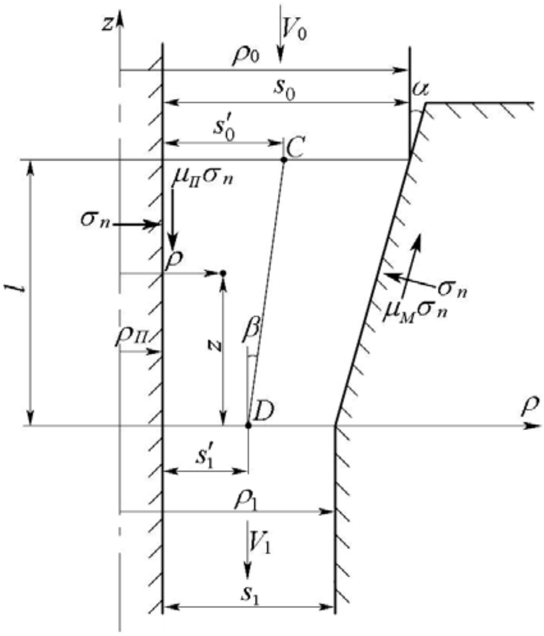

Рис. 1. Схема к анализу вытяжки с утонением стенки

Условие несжимаемости материала позволяет установить связь между скоростью течения материала на входе в очаг деформации и выходе из очага деформации:

$$V_0 = V_1 \frac{s_1 (s_1 + 2\rho_\Pi)}{s_0 (s_0 + 2\rho_\Pi)}\,. \tag{1}$$

Компоненты осевой V_z и радиальной V_ρ скоростей течения могут быть определены по выражениям:

$$V_z = -V_0 \frac{\left[\rho + (l-z)\,tg\beta\right]^2 - \rho_\Pi^2}{\rho^2 - \rho_\Pi^2}\,;\; V_\rho = -V_0 \frac{\left[\rho + (l-z)\,tg\beta\right]^2 - \rho_\Pi^2}{\rho^2 - \rho_\Pi^2} tg\beta\,, \tag{2}$$

где $tg\beta = \dfrac{tg\alpha\,(\rho - \rho_\Pi)}{s_0 - tg\alpha\,(l-z)}$.

Скорости деформаций рассчитываются по выражениям, полученным с учетом соотношений (2), условия несжимаемости материала $\xi_\rho = -\xi_z - \xi_\theta$, следующим образом:

$$\xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = 2V_0 \frac{s_0\, tg\alpha \left[\rho s_0 - (l-z)\, tg\alpha\, \rho_\Pi\right]}{(\rho + \rho_\Pi)\left[s_0 - (l-z)\, tg\alpha\right]^3};$$

$$\xi_\theta = \frac{V_\rho}{\rho} = -V_0 \frac{s_0\left[s_0(\rho+\rho_\Pi) - 2(l-z)\, tg\alpha\, \rho_\Pi\right](\rho - \rho_\Pi)\, tg\alpha}{(\rho+\rho_\Pi)\,\rho\left[s_0 - tg\alpha\,(l-z)\right]^3}; \qquad (3)$$

$$\xi_\rho = \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} = -V_0 \frac{s_0^2\, tg\alpha\, \rho^2 + s_0^2\, tg\alpha\, \rho_\Pi^2 - 2(l-z)\, tg^2\alpha\, \rho_\Pi^2\, s_0}{(\rho+\rho_\Pi)\left[s_0 - (l-z)\, tg\alpha\right]^3 \rho};$$

$$\xi_{\rho z} = \frac{1}{2} V_0 \frac{U}{V},$$

где

$$\left.\begin{aligned} U = s_0\, tg^2\alpha\,(\rho^2 - \rho_\Pi^2)\left[3\rho s_0 - 4(l-z)\,\rho_\Pi\, tg\alpha + \rho_\Pi s_0\right] - \\ - 2 s_0 \rho_\Pi\,(l-z)\; tg\alpha\left[s_0 - (l-z)\, tg\alpha\right]^2; \\ V = (\rho+\rho_\Pi)^2\left[s_0 - (l-z)\, tg\alpha\right]^4. \end{aligned}\right\}$$

Величина интенсивности скоростей деформаций ξ_i вычисляется по выражению [2]:

$$\xi_i = \sqrt{2(R_z + R_\theta + R_z R_\theta)}\left\{R_\theta^2\left[(1+R_z)\xi_\theta + R_z\xi_z\right]^2 + + R_\theta R_z\left[(1+R_z)\xi_z + R_\theta\xi_\theta\right]^2 + \right.$$
$$\left. + R_\theta\left(R_z\xi_z - R_\theta\xi_\theta\right)^2 + \frac{2\xi_{\rho z}^2}{R_{\rho z}} R_\theta^2\left(1 + R_\theta + R_z\right)^2\right\}^{1/2} / \left[\sqrt{3} R_z^{1/2} R_\theta\left(1 + R_\theta + R_z\right)\right], \qquad (4)$$

где $R_z = \dfrac{H}{G}$; $R_\theta = \dfrac{H}{F}$; $R_{\rho z} = \dfrac{M}{F}$; F, G, H, M - параметры анизотропии.

Выражение (4) позволяет определить распределение интенсивностей скоростей деформаций вдоль ряда (n) траекторий течения материала.

Накопленная интенсивность деформации вдоль траектории с учётом добавки деформации, связанной с изменением поворота траектории частицы материала при входе в очаг деформации, определяется по выражению:

$$\varepsilon_{i\kappa} = \sum_{z=l}^{0} \frac{\xi_{i\kappa}\Delta z}{V_{z\kappa}} + \sqrt{\frac{2\left(R_z + R_\theta + R_\theta R_z\right)}{3R_z}}\sqrt{\frac{1}{2R_{\rho z}}}\, tg\beta_k\,. \qquad (5)$$

Если нужно определить накопленную интенсивность деформации в заготовке после деформации, то следует к рассчитанной величине добавить ещё второй член к выражению (5) на выходе из очага деформации.

Имея в своем распоряжении кривую упрочнения материала, находим среднюю величину интенсивности напряжения σ_i в очаге деформации по формуле

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + A\varepsilon_{icp}^n, \qquad (6)$$

где σ_{i0}, B и n - параметры кривой упрочнения; ε_{icp} - средняя величина интенсивности деформации в очаге деформации.

Для определения напряжений в очаге деформации располагаем уравнениями теории пластического течения анизотропного материала

$$\sigma_z-\sigma_\theta=\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\xi_i}\frac{\left(R_\theta R_z+R_z+R_\theta\right)\left(R_z\xi_z-R_\theta\xi_\theta\right)}{R_zR_\theta\left(R_z+1+R_\theta\right)};$$

$$\sigma_\theta-\sigma_\rho=\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\xi_i}\frac{\left(R_\theta R_z+R_z+R_\theta\right)\left(\xi_\theta-R_z\xi_\rho\right)}{R_z\left(R_z+1+R_\theta\right)}; \tag{7}$$

$$\sigma_\rho-\sigma_z=\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\xi_i}\frac{\left(R_\theta R_z+R_z+R_\theta\right)\left(R_\theta\xi_\rho-\xi_z\right)}{R_\theta\left(R_z+1+R_\theta\right)};$$

$$\tau_{\rho z}=\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\xi_i}\frac{\left(R_\theta R_z+R_z+R_\theta\right)}{R_{\rho z}R_z}\xi_{\rho z}.$$

и уравнениями равновесия в цилиндрической системе координат [3]

$$\frac{\partial\sigma_\rho}{\partial\rho}+\frac{\partial\tau_{\rho z}}{\partial z}+\frac{\sigma_\rho-\sigma_\theta}{\rho}=0;\quad \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta}=0;\quad \frac{\partial\tau_{z\rho}}{\partial\rho}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{\tau_{z\rho}}{\rho}=0, \tag{8}$$

где $\sigma_\rho,\sigma_\theta,\sigma_z,\tau_{\rho z}$ - нормальные и касательное напряжения, являющиеся функциями ρ и z.

Рассмотрим третье уравнение равновесия из системы (8). Используя соотношения (7) и выражение для определения $\xi_{\rho z}$, получим

$$\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{1}{3}\frac{\sigma_{i\,cp}}{\xi_{i\,cp}}\frac{R_\theta R_z+R_z+R_\theta}{R_{\rho z}\,R_z}\left[F_{\rho z}(\rho,z)\right]_\rho+$$

$$+\frac{1}{3}\frac{\sigma_{i\,cp}}{\xi_{i\,cp}}\frac{R_\theta R_z+R_z+R_\theta}{R_{\rho z}\,R_z}\frac{F_{\rho z}(\rho,z)}{\rho}=0, \tag{9}$$

где $$F_{\rho z}(\rho,z)=\frac{1}{2}V_0\frac{U}{V};\qquad \left(F_{\rho z}(\rho,z)\right)_\rho=\frac{\partial}{\partial\rho}F_{\rho z}(\rho,z)=\frac{1}{2}V_0\times$$

$$\times\frac{s_0tg^2\alpha[9\rho^2s_0-8(l-z)\rho_\Pi\rho tg\alpha+2\rho_\Pi\rho s_0-3\rho_\Pi^2s_0]}{(\rho+\rho_\Pi)^2\left[s_0-(l-z)tg\alpha\right]^4}-$$

$$-\frac{1}{2}V_0\frac{s_0tg^2\alpha(\rho^2-\rho_\Pi^2)[3\rho s_0-4(l-z)\rho_\Pi tg\alpha+\rho_\Pi s_0]-}{(\rho+\rho_\Pi)^4\left[s_0-(l-z)tg\alpha\right]^8}$$

$$\frac{-2s_0\rho_\Pi(l-z)tg\alpha\left[s_0-(l-z)tg\alpha\right]^2 2(\rho+\rho_\Pi)\left[s_0-(l-z)tg\alpha\right]^4}{(\rho+\rho_\Pi)^4\left[s_0-(l-z)tg\alpha\right]^8}.$$

Представим приведенное выше уравнение в виде конечных разностей. Для интегрирования этого уравнения нужно сформулировать граничные условия. В соответствии с выбранной кинематикой течения на входе в очаге деформации и выходе из него происходит резкое изменение направления течения от вертикального до наклонного к осевой под углом β, что связано с разрывом тангенциальной составляющей скорости течения V_ρ. Изменение направления течения учитывается путем коррекции осевого напряжения на границе очага деформации по методу баланса мощностей следующим образом:

$$\Delta\sigma_z=\tau_{s\rho z}\sin\beta\cos\beta. \tag{10}$$

Заметим, что угол β на входе в очаг деформации определяется по формуле $tg\beta=tg\alpha(\rho-\rho_\Pi)/s_0$, а при выходе из очага деформации так $tg\beta=tg\alpha(\rho-\rho_\Pi)/s_1$.

Соотношение (10) будет граничным условием для уравнения (9) при $z=l$. Компоненты напряжений σ_ρ, σ_θ и $\overline{P}$ определяются из уравнений (7).

Составляющая силы P_{z1k} для преодоления трения на матрице находится по выражению:

$$P_{z1k} = \pi \mu_M \sigma_{nM\,cp} (\rho_{\Pi} + \frac{s_0 + s_1}{2}) \frac{l}{\cos\alpha} \cos\alpha \, .$$

Сила, разгружающая стенку изделия, определяется по формуле

$$P_{z2k} = \pi \mu_{\Pi} \sigma_{n\,\Pi\,cp} \rho_{\Pi} \, l \, .$$

Сила, передающаяся на стенку изделия, вычисляется так

$$P_{cm} = 2\pi \int\limits_{\rho_{\Pi}}^{\rho_{\Pi}+s_1} \sigma_z(\rho) \rho \, d\rho + P_{z1k} \, ,$$

а сила операции вытяжки определяется следующим образом

$$P = 2\pi \int\limits_{\rho_{\Pi}}^{\rho_{\Pi}+s_1} \sigma_z(\rho) \rho \, d\rho + P_{z1k} + P_{z2k} \, ,$$

где $\overline{P}$; $L = \dfrac{l}{\cos\alpha}$; $\sigma_{\rho\,\Pi\,cp} = \dfrac{1}{l} \int\limits_0^l \sigma_{\rho\Pi}(l) \, dl$.

Величину σ_{nM} находим по формуле преобразования компонент напряжений при переходе от одной системы координат к другой

$$\sigma_{nM} = \sigma_{\rho} \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha - \tau_{\rho z} \sin 2\alpha \, .$$

Приведенные выше соотношения могут быть использованы для оценки кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний, силовых режимов и предельных возможностей вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов.

Расчеты выполнены для операции вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из ряда материалов, механические свойства которых приведены в табл. 1, при следующих геометрических размерах заготовки: $s_0 = 4$ мм; D_0=40 мм.

Таблица 1

Механические характеристики исследуемых материалов

Материал	σ_{i0}, МПа	A, МПа	n	R_z	R_θ	$R_{\rho z}$
Сталь 08 кп	268,66	329,5	0,478	0,817	0,783	2,999
Латунь Л63	214,94	509,07	0,575	0,666	0,750	2,479
Алюминиевый сплав АМг6М	29,20	151,83	0,440	0,67	0,540	2,805

Продолжение табл. 1

Материал	Ω	U	a_0	a_1	a_2
Сталь 08 кп	1,791	-0,946	0,471	0,169	0,143
Латунь Л63	4,640	-0,769	0,793	-0,279	-0,246
Алюминиевый сплав АМг6М	2,148	-1,230	0,417	0,217	0,338

Графические зависимости изменения относительной величины силы процесса $\overline{P} = P_{cm} / [\pi(D_0 - s_0) s_0 \sigma_{i0}]$ от угла конусности матрицы α при вытяжке с утонением стенки полых цилиндрических заготовок из стали 08 кп представлены на рис. 2 ($D_0 = 2\rho_0$).

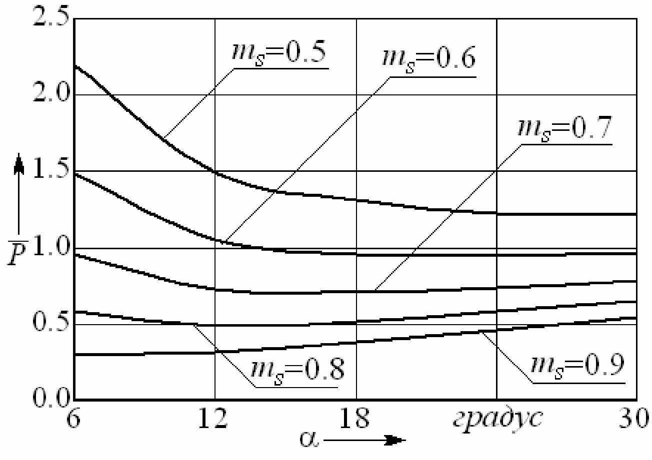

Рис. 2. Графические зависимости изменения $\overline{P}$ от α:
($\mu_M = 0{,}05$; $\mu_П = 0{,}1$)

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с увеличением угла конусности матрицы α, уменьшением коэффициента утонения m_s и относительной величины D_0 / s_0, увеличением коэффициентов трения на контактной поверхности матрицы μ_M и пуансона $\mu_П$ относительная величина осевого напряжения $\overline{\sigma}_z$ возрастает. Установлено, что при вытяжке с утонением стенки толстостенных заготовок существуют оптимальные углы конусности матрицы в пределах 12…18°, соответствующие наименьшей величине силы. Показано, что с увеличением коэффициента утонения m_s и отношения D_0 / s_0, уменьшением коэффициентов трения на контактной поверхности матрицы μ_M и пуансона $\mu_П$ относительная величина силы $\overline{P}$ уменьшается.

Предельные степени деформации вытяжки с утонением стенки определялись по максимальной величине растягивающего напряжения σ_{sz}^* с учетом упрочнения на выходе из очага пластической деформации (первый критерий)

$$\sigma_{z\,cp} \le \sigma_{sz}^*, \quad \sigma_{z\,cp} = \frac{P_{cm}}{\pi s_1 (s_1 + 2\rho_n)} \qquad (11)$$

и по величине степени использования ресурса (второй критерий)

$$\omega_e = \int \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{i\,np}(\sigma/\sigma_i)} \le \chi . \qquad (12)$$

Величина предельной интенсивности деформации $\varepsilon_{i\,np}$ находится по выражению

$$\varepsilon_{inp} = \Omega \exp\left(U \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) \left(a_0 + a_1 \cos\alpha + a_2 \cos\beta + a_3 \cos\gamma\right), \qquad (13)$$

где Ω, U, a_0, a_1, a_2 и a_3 - константы материала, определяемые в зависимости от рода материала согласно работам В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова и уточняющиеся из опытов на растяжение образцов в условиях плоского напряженного состояния в зависимости от анизотропии механических свойств ортотропного тела; α, β, γ - углы между первой главной осью напряжений и главными осями анизотропии; σ - среднее напряжение; $\sigma = (\sigma_\rho + \sigma_z + \sigma_\theta)/3$.

Интегрирование в выражении (12) ведется по траектории течения материала. До деформации $\omega_e = \chi = 0$. Разрушение будет иметь место при $\omega_e = \chi = 1$. В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготовляемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать величины χ. При назначении величин степеней деформации в процессе пластического формоизменения следует учитывать рекомендации по степени использования запаса пластичности В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова, согласно которым для ответственных деталей, работающих и подвергающихся после обработки давлением термической обработке (отжигу или закалке), допустимой величиной степени использования запаса пластичности следует считать $\chi = 0{,}25$, а для неответственных деталей допустимая степень использования запаса пластичности может быть принята $\chi = 0{,}65$ [4-6].

Приведенные выше неравенства (11) и (12) не разрешаются в явном виде относительно предельного коэффициента утонения $m_{s\,пр}$, поэтому зависимости предельного коэффициента утонения $m_{s\,пр}$ от технологических параметров процесса вытяжки с утонением стенки полых цилиндрических деталей из анизотропных материалов устанавливались путем численных расчетов по этим неравенствам на ЭВМ.

Графические зависимости изменения предельного коэффициента утонения $m_{s\,пр}$, вычисленного по первому (11) и второму (12) критериям разрушения, от угла конусности матрицы α для алюминиевого сплава АМг6М приведены на рис. 3. Здесь кривая 1 соответствует величине $m_{s\,пр}$, определенной по максимальной величине осевого напряжения σ_z на выходе из очага пластической деформации (11); кривая 2 соответствует величине $m_{s\,пр}$, вычисленной по степени использования ресурса пластичности (12) при $\chi = 0{,}25$; кривая 3 – при $\chi = 0{,}65$; кривая 4 - $\chi = 1{,}0$. Расчеты выполнены при $\mu_П = 0{,}1$; $\mu_М = 0{,}05$; $s_0 = 4$ мм; D_0=40 мм. Положения кривых 1 – 4 определяют возможности деформирования заготовки в зависимости от технических требований на изделие.

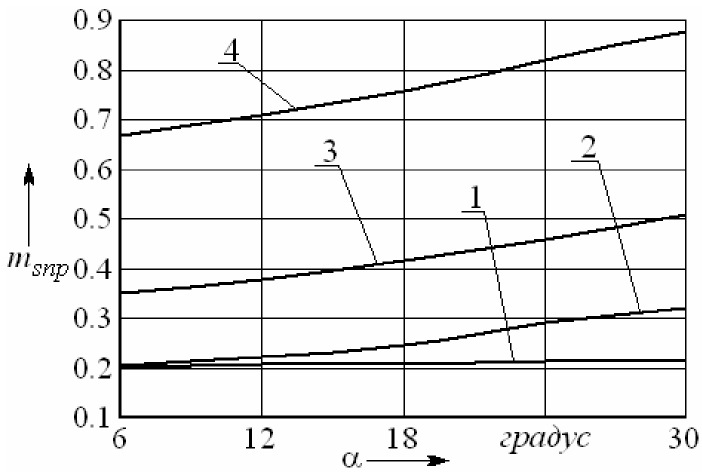

Рис. 3. Графические зависимости изменения $m_{s\,пр}$ от α

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с увеличением угла конусности матрицы α и коэффициента трения на контактной поверхности матрицы μ_M, уменьшением относительной величины D_0 / s_0 предельный коэффициент утонения $m_{s\,пр}$ увеличивается. Полученные результаты качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными, полученными другими авторами [2].

Показано существенное влияние анизотропии механических свойств на силовые режимы и предельные возможности формообразования вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических деталей. Установлено, что величины относительного напряжения и силы увеличиваются с ростом коэффициента нормальной анизотропии R. Увеличение коэффициента анизотропии R от 0,2 до 2 приводит к росту относительных величин осевого напряжения $\overline{\sigma}_z$ на 50%, а силы $\overline{P}$ - на 30%. Показано, что рост коэффициента анизотропии R от 0,2 до 2 сопровождается увеличением предельного коэффициента утонения $m_{s\,пр}$ на 30%.

Литература

1. Яковлев С.С. Математическая модель процесса вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропного материала / С.С. Яковлев, О.В. Пилипенко, А.И. Агеева // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – Вып. 2. – С. 69 – 77.
2. Яковлев С.П. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. - Кишинев: Квант. - 1997.- 331 с.
3. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. – 836 с.
5. Богатов А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, В.С. Смирнов. - М.: Металлургия, 1984. - 144 с.
6. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.