УДК 539.388.22

ВОЛОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ ЧЕРЕЗ КОНИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

ЦОЙ Д. Н.

В [1] рассматривается установившееся и неустановившееся волочение тонкостенной трубы из изотропного неупрочняющегося материала при отсутствии сил трения между заготовкой и инструментом. Анализ установившегося волочения тонкостенной трубы из изотропного неупрочняющегося материала через коническую матрицу с учетом сил трения между заготовкой и инструментом сделан в [2], а в [3] рассмотрена эта же задача для изотропного упрочняющегося материала. В [4] с применением теории течения Мизеса — Хилла проведено исследование установившегося и неустановившегося волочения тонкостенной трубы из анизотропного неупрочняющегося материала при отсутствии сил трения между заготовкой и инструментом.

1. Рассмотрим установившееся волочение тонкостенной трубы из анизотропного упрочняющегося материала через коническую матрицу с учетом сил трения между заготовкой и инструментом. Материал считается подчиняющимся закону текучести Мизеса — Хилла, упрочнение принимается изотропным. Воспользуемся безмоментной теорией конических оболочек переменной толщины, внеконтактная деформация не учитывается, напряженное состояние принимается плоским. Трение учитывается по закону Амонтона — Кулона.

При волочении тонкостенной трубы главные оси напряжений совпадают с осями анизотропии, условие пластичности и уравнения течения [5] принимают вид

$$F\sigma_y^2+G\sigma_x^2+H(\sigma_x-\sigma_y)^2=1 \tag{1.1}$$

$$d\varepsilon_x=d\lambda[H(\sigma_x-\sigma_y)+G\sigma_x]$$

$$d\varepsilon_y=d\lambda[F\sigma_y+H(\sigma_y-\sigma_x)],\quad d\varepsilon_z=-d\lambda(G\sigma_x+F\sigma_y) \tag{1.2}$$

где σ_x и σ_y — нормальные напряжения в осях анизотропии, $d\varepsilon_x$, $d\varepsilon_y$ и $d\varepsilon_z$ — приращения деформаций в осях анизотропии, F, G и H — параметры анизотропии, $d\lambda$ — коэффициент пропорциональности.

Формулы интенсивностей напряжений и приращений деформаций по теории энергетического упрочнения [5] принимают соответственно вид

$$\sigma_i=(3/2)^{1/2}(F+G+H)^{-1/2}[F\sigma_y^2+G\sigma_x^2+H(\sigma_x-\sigma_y)^2]^{1/2} \tag{1.3}$$

$$d\varepsilon_i=(2/3)^{1/2}(F+G+H)^{1/2}(FG+GH+HF)^{-1}[F(Gd\varepsilon_y-Hd\varepsilon_z)^2+G(Hd\varepsilon_z-$$

$$-Fd\varepsilon_x)^2+H(Fd\varepsilon_x-Gd\varepsilon_y)^2]^{1/2} \tag{1.4}$$

Для упрочняющегося материала параметры анизотропии и коэффициент $d\lambda$ изменяются по мере деформации. При изотропном упрочнении отношения параметров анизотропии остаются неизменными.

Совместим оси анизотропии x, y и z соответственно с меридиональным и окружным направлениями и нормалью к поверхности трубы. Из уравнения (1.3) находим

$$\sigma_{\theta 1}=\sigma_{m1}H(F+H)^{-1}\pm[(2/3)(F+G+H)(F+H)^{-1}-\sigma_{m1}^2(FG+GH+HF)(F+H)^{-2}]^{1/2},$$

$$\sigma_{m1}=\sigma_m/\sigma_i,\quad \sigma_{\theta 1}=\sigma_\theta/\sigma_i \tag{1.5}$$

где σ_m, σ_θ — меридиональное и окружное нормальные напряжения, σ_{m1}, $\sigma_{\theta 1}$ — относительные меридиональное и окружное нормальные напряжения. В формуле (1.5) знак «плюс» относится к процессам раздачи и протяжки, а знак «минус» — к процессам волочения и обжима.

Из выражений (1.2) получаем

$$d\varepsilon_z=-\psi_1 d\varepsilon_\theta,\quad d\varepsilon_m=(\psi_1-1)d\varepsilon_\theta \tag{1.6}$$

$$\psi_1=(G\sigma_{m1}+F\sigma_{\theta 1})[(F+H)\sigma_{\theta 1}-H\sigma_{m1}]^{-1} \tag{1.7}$$

где $d\varepsilon_m$, $d\varepsilon_\theta$ — приращения деформаций в меридиональном и окружном направлениях.

Подставляя значения (1.6) в формулу (1.4), получим

$$d\varepsilon_i=\psi_2 d\varepsilon_\theta \tag{1.8}$$

$$\psi_2=(2/3)(F+G+H)[(F+H)\sigma_{\theta 1}-H\sigma_{m1}]^{-1} \tag{1.9}$$

Так как $d\varepsilon_z=ds/s$, $d\varepsilon_\theta=d\rho/\rho$, то уравнение равновесия тонкостенной конической оболочки [2] с учетом зависимостей (1.6) — (1.9) принимает вид

$$\rho d\sigma_{m1}/d\rho+\psi_2(1/\sigma_i)(d\sigma_i/d\varepsilon_i)\sigma_{m1}+\psi_3=0 \tag{1.10}$$

$$\psi_3=(1-\psi_1)\sigma_{m1}-(1+\mu\operatorname{ctg}\alpha)\sigma_{\theta 1} \tag{1.11}$$

где ρ — радиус рассматриваемого элемента заготовки, s — текущая толщина заготовки, μ — коэффициент трения между заготовкой и инструментом, α — угол конусности матрицы.

Величины ψ_1, ψ_2 и ψ_3 не зависят от деформации и для данного материала зависят от напряженного состояния.

Закон упрочнения материала примем в виде степенной функции $\sigma_i = C(\varepsilon_{i0} + \int d\varepsilon_i)^n$, где C и n – константы материала, ε_{i0} – интенсивность деформаций в начале очага деформации. Тогда уравнение (1.10) примет вид

$$d\sigma_{m1}/d\varepsilon_\theta + \left[n\psi_2 \Big/ \left(\varepsilon_{i0} + \int d\varepsilon_i \right) \right] \sigma_{m1} + \psi_3 = 0 \qquad (1.12)$$

Очаг деформации разобьем на малые участки, в пределах каждого из которых напряженное состояние и свойства материала будем считать однородными. Для каждого элементарного участка величины $\sigma_{\theta 1}$, ψ_1, ψ_2 и ψ_3 определяются по среднему значению относительного меридионального напряжения на данном участке. Тогда из уравнения (1.12) для каждого элементарного участка получим

$$\Delta\varepsilon_\theta = -\psi_4 \pm (\psi_4^2 - \psi_5)^{1/2} \qquad (1.13)$$

$$\psi_4 = (n\sigma_{m1} + (1/2)\Delta\sigma_{m1})/\psi_3 + \varepsilon_{i1}/\psi_2$$

$$\psi_5 = (2\Delta\sigma_{m1}/\psi_3)(\varepsilon_{i1}/\psi_2) \qquad (1.14)$$

где ε_{i1} – интенсивность деформаций в начале рассматриваемого элементарного участка, равна сумме интенсивностей приращений деформаций на предыдущих участках, $\Delta\sigma_{m1}$, $\Delta\varepsilon_\theta$ – приращения относительного меридионального напряжения и окружной деформации на рассматриваемом участке.

В формуле (1.13) знак «плюс» относится к процессам протяжки и раздачи, а «минус» – к процессам волочения и обжима.

Для неупрочняющегося материала из уравнения (1.12) находим

$$\Delta\varepsilon_\theta = -\Delta\sigma_{m1}/\psi_3 \qquad (1.15)$$

Для любого элементарного участка имеем

$$\frac{\rho}{R} = \exp\left(\sum_{j=1}^{k} \Delta\varepsilon_{\theta j}\right), \qquad \frac{s}{s_0} = \exp\left(\sum_{j=1}^{k} -\psi_1\Delta\varepsilon_{\theta j}\right) \qquad (1.16)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i1} + \psi_2\Delta\varepsilon_{\theta k} \qquad (1.17)$$

где R и s_0 – радиус и толщина заготовки до деформации, k – номер участка, отсчитываемый от начала очага деформации.

Максимальное значение относительного меридионального напряжения получаем из зависимости (1.3) при $\sigma_\theta = \sigma_y = 0$:

$$\sigma_{m1}^{\max} = [(2/3)(F+G+H)(F+H)^{-1}]^{1/2} \qquad (1.18)$$

Для упрочняющегося материала решается система уравнений (1.5), (1.7), (1.9), (1.11), (1.13), (1.14), (1.16) – (1.18), для неупрочняющегося материала – система уравнений (1.5), (1.7), (1.9), (1.11), (1.14) – (1.18).

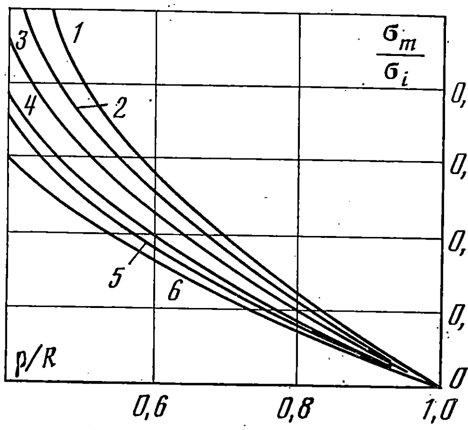
2. Численно решалась задача волочения трубы при: $\mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha=0$; 0,5; $n=0$; 0,2; 0,4; $G/F=0{,}5$; 1; 2; $H/F=0{,}3$; 0,6; 1; 2; 3. Приращение напряжений принималось равным $\Delta\sigma_{m1}=0{,}05$, в начале очага деформации полагалось $\varepsilon_{i0}=0{,}002$ и $\sigma_{m1}=0$.

На фиг. 1 показано распределение относительного меридионального напряжения σ_{m1}. Кривая *1* соответствует $H/F=0{,}3$, $n=0$; *2* – $H/F=1$, $n=0$; *3* – $H/F=3$, $n=0$; *4* – $H/F=0{,}3$, $n=0{,}4$; *5* – $H/F=1$, $n=0{,}4$; *6* – $H/F=3$, $n=0{,}4$. При изменении показателя упрочнения от 0 до 0,4 величина σ_{m1} уменьшается на 25–45%, при изменении отношения H/F от 0,3 до 3 – на 15–39%, при изменении G/F от 0,5 до 2 увеличивается на 16–50%, при изменении $\mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha$ от 0 до 0,5 увеличивается на 27–48%. Распределение интенсивности деформаций ε_i аналогично распределению относительного меридионального напряжения.

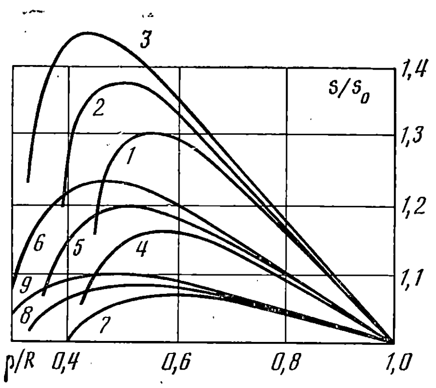
При изменении показателя n от 0 до 0,4 величина ε_i уменьшается на 3–34%, при изменении H/F от 0,3 до 3 – на 12–32%, при изменении G/F от 0,5 до 2 увеличивается на 18–63%, при изменении $\mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha$ от 0 до 0,5 увеличивается на 1–13%. При отсутствии трения имеет место зависимость $\varepsilon_i = (1+n)\sigma_{m1}$.

На фиг. 2 представлены распределения относительной толщины s/s_0. Кривая *1* соответствует $H/F=0{,}3$, $n=0$; *2* – $H/F=0{,}3$, $n=0{,}2$; *3* – $H/F=0{,}3$, $n=0{,}4$; *4* – $H/F=1$, $n=0$; *5* – $H/F=1$, $n=0{,}2$; *6* – $H/F=1$, $n=0{,}4$; *7* – $H/F=3$, $n=0$; *8* – $H/F=3$, $n=0{,}2$; *9* – $H/F=3$, $n=0{,}4$.

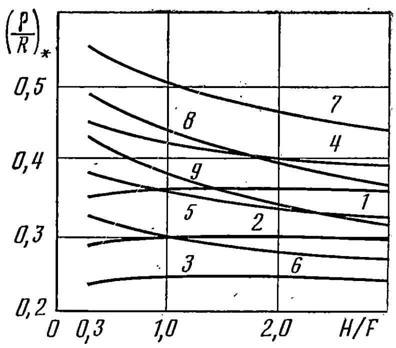
Зависимость s/s_0 от ρ/R имеет максимум. При изменении H/F от 0,3 до 3 относительный радиус, при котором имеет место максимальное значение толщины, увеличивается на 3–20%, при изменении G/F от 0,5 до 2 – на 36–100%, при изменении $\mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha$ от 0 до 0,5 – на 6–41%, при изменении показателя n от 0 до 0,4 уменьшается на 10–29%. При увеличении показателя упрочнения n и уменьшении отношений H/F и G/F изменение толщины заготовки происходит более интенсивно. При изменении H/F от 0,3 до 3 величина максимума толщины уменьшается на 6–36%, при изменении G/F от 0,5 до 2 – на 4–30%, при изменении $\mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha$ от 0 до 0,5 – на 2–13%, при изменении показателя упрочнения n от 0 до 0,4 увеличивается на 1,5–18%.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Для изотропного неупрочняющегося материала при отсутствии трения максимум толщины имеет место при относительном радиусе $\rho/R=0{,}572$ и максимум относительной толщины равен 1,16, что согласуется с результатами [1].

Характер изменения критического относительного радиуса показан на фиг. 3. Критический относительный радиус $\rho^*=(\rho/R)_*$ представляет собой относительный радиус слоя, где окружное нормальное напряжение равно нулю. Кривая *1* соответствует $G/F=0{,}5$, $n=0$; *2* – $G/F=0{,}5$, $n=0{,}2$; *3* – $G/F=0{,}5$, $n=0{,}4$; *4* – $G/F=1$, $n=0$; *5* – $G/F=1$, $n=0{,}2$; *6* – $G/F=1$, $n=0{,}4$; *7* – $G/F=2$, $n=0$; *8* – $G/F=2$, $n=0{,}2$; *9* – $G/F=2$, $n=0{,}4$. При $\mu=0$ и изменении n от 0 до 0,4 величина ρ^* уменьшается на 22–33%, при изменении H/F от 0,3 до 3 и $G/F=0{,}5$ увеличивается на 3–4%, при $G/F=1$ уменьшается на 11–15,5%, при $G/F=2$ уменьшается на 18–25%. При изменении G/F от 0,5 до 2 радиус ρ^* увеличивается на 23–83%. При $\mu\operatorname{ctg}\alpha=0{,}5$ и изменении n от 0 до 0,4 величина ρ^* уменьшается на 19–30%. При изменении H/F от 0,3 до 3 и $G/F=2$ радиус ρ^* уменьшается на 15–17%, при $G/F=1$ – на 12–19%, при $G/F=0{,}5$ почти не изменяется. При изменении G/F от 0,5 до 2 радиус ρ^* увеличивается на 17–62%. При изменении $\mu\operatorname{ctg}\alpha$ от 0 до 0,5 величина ρ^* увеличивается на 16–36%. Для изотропного неупрочняющегося материала $\rho^*=0{,}425$, что совпадает с данными [1].

Таким образом, на распределение относительного меридионального напряжения существенное влияние оказывают все три фактора: упрочняемость и анизотропия механических свойств материала и трение между заготовкой и инструментом. На распределение интенсивности деформаций и толщины наиболее существенно влияет анизотропия механических свойств материала. На величину критического радиуса наиболее существенно влияет анизотропия механических свойств, а также показатель упрочнения материала и трение между заготовкой и инструментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соколовский В. В.* Теория пластичности. М.: Высш. шк. 1969. 608 с.
2. *Малинин Н. Н.* Волочение труб через конические матрицы // Изв. АН СССР. Механика. 1965. № 5. С. 122–124.
3. *Бубнова Л. В., Малинин Н. Н.* Напряжения и деформации при формоизменении тонкостенных труб // Изв. вузов. Машиностроение. 1965. № 10. С. 199–203.
4. *Геогджаев В. О.* Волочение тонкостенных анизотропных труб сквозь коническую матрицу // Прикл. механика. 1968. Т. 4. № 2. С. 79–83.
5. *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат. 1956. 407 с.

Алма-Ата

Поступила в редакцию
8.VII.1985