

$$\frac{P}{K_1 f} = \left(\frac{K_1}{E_1} \right)^{\frac{1}{1-n}} \left[1 + \frac{R_1}{\epsilon_1} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right] \left\{ 1 - \left(\frac{K_1}{E_1} \right)^{\frac{1}{1-n}} \times \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{R_1}{\epsilon_1} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right] \right\}, \quad (11)$$

где f — площадь поперечного сечения обшивки.

В целях уменьшения объема технологических расчетов формулы (10) и (11) представим в виде номограммы (рис. 2). В общем же случае для определения P и ϵ_n можно применить вычисления на ЭВЦМ.

В статье представлена программа расчета уравнений (10) — F_1 и (11) — F_2 , написанная на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60 для ЭВЦМ «БЭСМ-4» (транслятор ТА—1М).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пляюшин А. А. Пластичность. М., Гостехиздат, 1948.
2. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее применение в технике. М., Гостехиздат, 1949.
3. Арышенский Ю. М., Калужский Н. И., Уваров В. В. Некоторые вопросы теории пластичности ортотропных сред. Известия вузов «Авиационная техника» № 2, 1969.
4. Падан А. Пластичность и разрушение твердых тел, т. 2. М., «Мир», 1969.

В. В. Уваров, Ю. М. Арышенский, В. И. Мордасов

О НАПРЯЖЕНИЯХ И ДЕФОРМАЦИЯХ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ АНИЗОТРОПНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ В КОНИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ

В производстве деталей летательных аппаратов широкое применение находят процессы деформирования, связанные с обжимом, раздачей, волочением тонкостенных трубных заготовок. Последние, как правило, обладают резко выраженной анизотропией свойств. Анизотропия материала, как и другие параметры процесса, оказывает заметное влияние на величину и характер возникающих напряжений и деформаций. Этот факт нашел отражение в некоторых опубликованных работах [1], [2], [3]. Однако, несмотря на принципиальную возможность учета анизотропии, все же имеется ряд вопросов, требующих дальнейшего исследования в направлении обобщения методики решения и нахождения приемов получения конечных зависимостей для неупрочняемых и упрочняемых металлов.

Положим в основу анализа процесса формоизменения тонкостенной трубной заготовки метод совместного решения уравне-

ний равновесия и пластичности. Деформируемый металл прием ортотропным, подчиняющийся условию текучести [4], и считаем при этом, что оси анизотропии совпадают с направлениями меридиональных и окружных напряжений. Уравнение равновесия такой оболочки, деформируемой в конической матрице с учетом изменения толщины заготовки [5], выражается формулой

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} + \frac{r}{\delta} \frac{d\delta}{dr} \sigma_m + \sigma_m - K\sigma_t = 0; \quad (1)$$

$$K = 1 + f \operatorname{ctg} \alpha,$$

где

- σ_m и σ_t — меридиональные и окружные напряжения;
- r — текущий радиус очага деформации;
- f — коэффициент трения;
- α — угол конусности матрицы.

Приращения главных деформаций в окружном направлении de_t и в направлении нормали к оболочке de_n составляют:

$$de_t = \frac{dr}{r} \quad \text{и} \quad de_n = \frac{d\delta}{\delta}. \quad (2)$$

Используя соотношения (2) и физические уравнения [4], преобразуем выражение (1)

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} - \frac{a\sigma_m^2 + b\sigma_m\sigma_t + K\sigma_t^2}{\sigma_t - \mu_{mt}\sigma_m} = 0, \quad (3)$$

где

$$a = \mu_{mt} + \mu_{nm} \frac{\mu_{mt}}{\mu_{tm}}, \quad b = -\mu_{mt}(K + 1),$$

μ_{mt} , μ_{tm} — коэффициенты анизотропии в пластической области, первый индекс указывает направление поперечной деформации, а второй — направление действия силы при линейном растяжении.

Условие пластичности ортотропного тела [4] для плосконапряженного состояния представляет собой в координатной системе $\sigma_m - \sigma_t$ уравнение эллипса. Поэтому его можно представить в следующей параметрической форме:

$$\sigma_m = \sigma_{tm} \frac{\cos \Psi}{\sqrt{1 - \mu_{mt}\mu_{tm}}};$$

$$\sigma_t = \sigma_{tm} \frac{\cos(\Psi - \gamma)}{\sqrt{1 - \mu_{mt}\mu_{tm}}} \sqrt{\frac{\mu_{mt}}{\mu_{tm}}}; \quad (4)$$

$$\gamma = \arcsin \sqrt{1 - \mu_{mt}\mu_{tm}}.$$

где σ_{tm} — напряжение текучести в направлении m .

Параметр Ψ однозначно характеризует условие пластичности и имеет различные пределы изменения, зависящие от условий той или иной конкретной задачи.

$$\begin{aligned}
 \sigma_m > 0, \sigma_l < 0 & \quad \frac{3}{2}\pi \leq \Psi \leq \frac{3}{2}\pi + \gamma; \\
 \sigma_m < 0, \sigma_l > 0 & \quad \frac{\pi}{2} \leq \Psi \leq \frac{\pi}{2} + \gamma; \\
 \sigma_m > 0, \sigma_l \geq 0 & \quad \gamma - \frac{\pi}{2} \leq \Psi \leq \frac{\pi}{2}; \\
 \sigma_m < 0, \sigma_l < 0 & \quad \gamma + \frac{\pi}{2} \leq \Psi \leq \frac{3}{2}\pi.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Подставляя значения σ_m и σ_l из условия (4) в выражение (3), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dr}{r} = \frac{\operatorname{tg}^2 \Psi \, d\Psi}{B + \operatorname{ctg} \varphi + D \operatorname{tg}^2 \Psi}, \tag{6}$$

где

$$\begin{aligned}
 B &= -\left(\nu_{ml} + \frac{\nu_{nm}}{\nu_{tm}}\right) \sqrt{\frac{\nu_{mt} \nu_{tm}}{1 - \nu_{mt} \nu_{tm}}}; \\
 C &= \nu_{tm} (1 - K); \\
 D &= -K \sqrt{\frac{\nu_{mt}}{1 - \nu_{mt} \nu_{tm}}}.
 \end{aligned}$$

Если воспользоваться физическими уравнениями, то можно найти взаимосвязь изменения толщины с параметром Ψ , также выраженной в дифференциальной форме

$$\frac{d\delta}{\delta} = (1 - \nu_{ml}) \frac{(A + \operatorname{tg} \Psi) \operatorname{tg} \Psi \, d\Psi}{B + \operatorname{ctg} \varphi + D \operatorname{tg}^2 \Psi}, \tag{7}$$

где

$$A = \frac{\nu_{mn} \sqrt{\frac{\nu_{tm}}{\nu_{mt}}} + \sqrt{\nu_{mt} \nu_{tm}}}{\sqrt{1 - \nu_{mt} \nu_{tm}}}.$$

В результате решения уравнений (6) и (7) определяется связь функции Ψ с переменным радиусом очага деформации r и толщиной стенки. Затем, используя параметрическую форму (4), находим поле напряжений.

Точное решение выражений (6) и (7) при интегрировании элементарных функций приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned}
 \ln \frac{r}{r_0} &= \frac{2F_1 - F_2 \frac{C}{D}}{\sqrt{4BD - C^2}} \left(\operatorname{arctg} \frac{C + 2Dm}{\sqrt{4BD - C^2}} - \operatorname{arctg} \frac{C + 2Dm_0}{\sqrt{4BD - C^2}} \right) + \\
 &+ \frac{F_2}{2D} \ln \frac{B + Cm + Dm^2}{B + Cm_0 + Dm_0^2} + F_3 (\operatorname{arctg} m - \operatorname{arctg} m_0) + \\
 &\quad \frac{F_4}{2} \ln \frac{1 + m^2}{1 + m_0^2};
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\ln \frac{\delta}{\delta_0} = (1 - \nu_{ml}) \frac{2H_1 - H_2 \frac{C}{D}}{\sqrt{4BD - C^2}} \left(\operatorname{arctg} \frac{C + 2Dm}{\sqrt{4BD - C^2}} - \operatorname{arctg} \frac{C + 2Dm_0}{\sqrt{4BD - C^2}} \right) +$$

$$+ \frac{H_3}{2D} \ln \frac{B + Cm + Dm^2}{B + Cm_0 + D^2m_0} + H_3 (\operatorname{arctg} m - \operatorname{arctg} m_0) + \frac{H_4}{2} \ln \frac{1 + m_2}{1 + m_0^2}, \quad (9)$$

где

$$m = \operatorname{tg} \Psi; \quad m_0 = \operatorname{tg} \Psi_0,$$

$$F_1 = \frac{B(B-D)}{C^2 + (B-D)^2}, \quad H_1 = -B \frac{AC - B + D}{C^2 + (B-D)^2};$$

$$F_2 = -\frac{CD}{C^2 + (B-D)^2}, \quad H_2 = -D \frac{C + A(B-D)}{C^2 + (B-D)^2};$$

$$F_3 = -\frac{B-D}{C^2 + (B-D)^2}, \quad H_3 = \frac{AC - B + D}{C^2 + (B-D)^2};$$

$$F_4 = \frac{C}{C^2 + (B-D)^2}, \quad H_4 = \frac{C + A(B-D)}{C^2 + (B-D)^2}.$$

Выражения (8) и (9) носят общий характер в том смысле, что они применимы для всех рассматриваемых операций формоизменения трубных анизотропных заготовок (5). При анализе конкретного процесса следует применить соответствующие граничные условия $\Psi = \Psi_0$. Так, для операции обжима в конической матрице ($\sigma_m > 0, \sigma_l > 0$) с углом $\alpha = 14^\circ$ зависимости $\frac{\sigma_m}{\sigma_{lm}} = f_1\left(\frac{r}{r_0}\right)$, $\frac{\sigma_l}{\sigma_{lm}} = f_2\left(\frac{r}{r_0}\right)$ и $\frac{\delta}{\delta_0} = f_3\left(\frac{r}{r_0}\right)$ представлены на графике (рис. 1) сплошной линией. Здесь и в дальнейшем для простоты и наглядности графиков рассмотрен случай трансверсальной изотропии $\mu_{mt} \neq \mu_{lm} = 0,5$.

Уравнения (8) и (9) являются довольно громоздкими и трудоемкими для вычислений. Поэтому, применяя известные методы аппроксимации подынтегрального выражения (6), эти уравнения можно привести к виду, более удобному для инженерных расчетов.

Например, для процесса обжима выражения интегралов примут вид

$$\ln \frac{r}{r_0} = -\frac{1}{K} \frac{\mu_{mt}}{\mu_{lm}} \left(\frac{\tilde{S}_1}{3} \mu_{mt}^2 z^2 - \tilde{S}_2 \mu_{mt} z + \tilde{S}_3 \right) z; \quad (10)$$

$$\ln \frac{\delta}{\delta_0} = -\frac{\mu_{lm}}{K} \left[\frac{\tilde{S}_4}{3} \mu_{mt} z^2 + \frac{\tilde{S}_5}{2} \left(\mu_{mt} \frac{\mu_{ln}}{\mu_{mn}} - 1 \right) z - \tilde{S}_6 \frac{\mu_{ln}}{\mu_{mn}} \right] z; \quad (11)$$

$$0 \leq z \leq 1, \quad \rho \leq \frac{r}{r_0} \leq 1, \quad 1 \leq \frac{\delta}{\delta_0} \leq \frac{\tilde{r}_p}{\delta_0},$$

где $\tilde{S}_1, \dots, \tilde{S}_6$ — коэффициенты приближения, обеспечивающие необходимую точность аппроксимации.

$z = \frac{\sigma_m}{\sigma_l} = \frac{1}{\mu_{mt}} \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{\mu_{mt} + \mu_{tm}} - 1} \operatorname{tg} \psi}$ — функция, однозначна связанная с параметром ψ ;

ρ — относительный радиус; $\sigma_m = \sigma_l$.

Результаты расчетов по приближенным формулам (10) и (11) приведены на графике в виде кривых, нанесенных пунктирными линиями. Сравнение их с точными решениями показывает, что расхождение не превышает 2—3%.

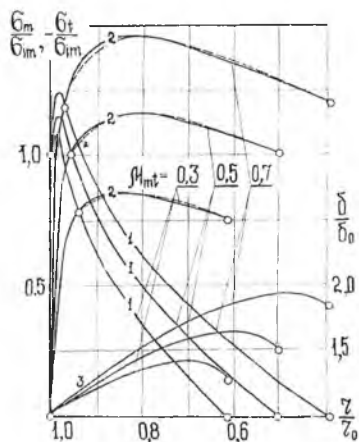


Рис. 1. Зависимость меридиональных (кривые 1) и окружных (кривые 2) напряжений, относительной толщины (кривые 3) при обжиме тонкостенной анизотропной трубы в конической матрице

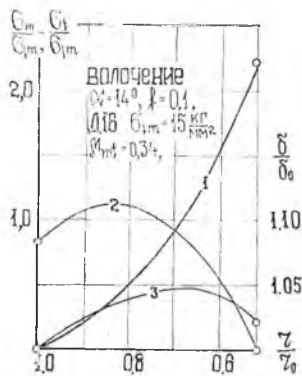


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние при волочении тонкостенной трубы в конической матрице (1 и 2 — меридиональное и окружное напряжение, 3 — относительная толщина)

Кроме указанных методов решения уравнений (6) и (7) может быть использовано численное интегрирование с привлечением ЭВЦМ, в том числе и машин с малой оперативной памятью. Авторами была разработана программа интегрирования дифференциальных уравнений ЭВЦМ «Промисль 1М».

Следует отметить, что при использовании численного интегрирования можно получить решение и для упрочняемых материалов, у которых $\sigma_{im} = \Phi(\epsilon_{im})$ [6].

На рис. 2 представлены результаты расчетов процесса волочения тонкостенной трубы из сплава Д16 с учетом его упрочнения.

ВЫВОДЫ

1. Получены различные варианты конечных решений общей задачи осесимметричного формоизменения тонкостенной анизот-

ройной трубы из неупрочняемого материала в коническом очаге деформации.

2. Определены поля напряжений и деформаций при формоизменении анизотропного упрочняемого металла. Характер и величина возникающих напряжений и деформаций резко отличается от идеального пластического тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геогджаев В. О. Волочение тонкостенных анизотропных труб сквозь коническую матрицу. М., Ж. «Прикладная механика», т. 4, № 2, 1968.
2. Bratt. I. F., Adams A. L., On the Drawing Process of Thin-Walled Tubes of Anisotropic Material., I. of Franklin. Inst. Vol 290, N 4, 1970.
3. Толоконников Л. А., Яковлев С. П., Дьялин В. М. Влияние анизотропии на процесс обжима цилиндрических заготовок в конических матрицах. Известия вузов, М., «Машиностроение», 10, 1971.
4. Арышевский Ю. М., Калужский И. И., Уваров В. В. Вопросы теории пластичности анизотропных сред., Известия вузов, М., «Авиационная техника», № 2, 1969.
5. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М., «Машиностроение», 1968.
6. Бубнова Л. В., Малинин Н. Н. Напряжения и деформации при формоизменении тонкостенных труб. Известия вузов, М., «Машиностроение», 10, 1965.

Е. П. Смеляков, И. Н. Сорокин, Т. А. Юркеник, Т. М. Федорова

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ С ВИБРАЦИЕЙ

Из литературы известно, что штамповка материалов с применением вибраций улучшает распределение деформации по сечению, вызывает добавочное приращение абсолютного удлинения, снижает сопротивление деформированию.

Повышение пластичности металлов в процессах листовой штамповки имеет большое практическое значение, так как металл, обладающий повышенной пластичностью, можно деформировать при меньших усилиях и при этом получать детали более сложной конфигурации и равномерные по механическим свойствам.

Цель данной работы — исследовать процессы пластического деформирования металлов в условиях, характеризующихся приложением статического усилия растяжения в сочетании с вибрационным. Эксперименты производились на специальных образцах из листов марки Д16АМ [1]. В связи с отсутствием разрывных испытательных машин, обеспечивающих одновременное приложение статических и вибрационных нагрузок, опыты по растяжению образцов производились в два этапа.

Первый этап работы заключался в предварительном вибраци-