

УДК 539.374.001.8.

Чигиринский В. В.
Матюхин А. Ю.**ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНЫХ НАГРУЗОК ПРИ ОСАДКЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ
НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА**

Как известно, при осадке толстостенной полой заготовки при отсутствии смазки на торцевых поверхностях происходит двустороннее течение металла (рис. 1) [1]. Таким образом происходит одновременное увеличение радиуса наружной боковой поверхности и уменьшение радиуса внутренней боковой поверхности.

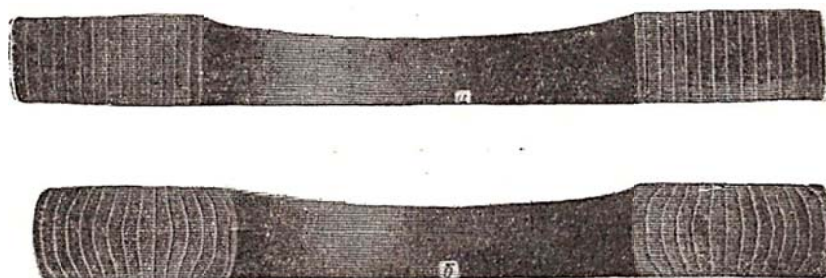


Рис. 1. Схема течения металла при осадке кольца со смазкой и в условиях сухого трения

Граница разделения течения металла внутрь и наружу является цилиндрической поверхностью, которая называется нейтральной поверхностью либо нейтральным радиусом. Зная положение нейтральной поверхности, можно определить размеры полой заготовки при осадке без учета бочкообразования (рис. 2).

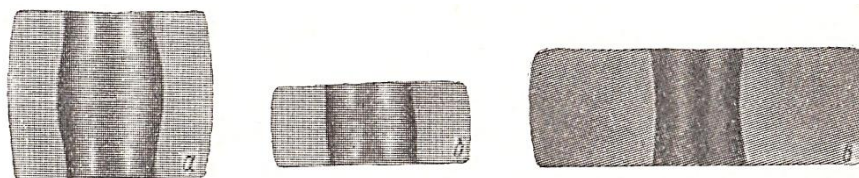


Рис. 2. Схема деформации полой толстостенной заготовки

Решение осесимметричной плоской задачи теории пластичности [1], [2] использовано для определения напряженного состояния толстостенной трубы при осевом нагружении. Показано влияние ряда факторов.

Известными факторами, влияющими на процесс пластического течения металла и распределения нейтральной поверхности, являются соотношение длины и высоты очага деформации S/h , т. е. фактора формы, а также коэффициент трения в месте контакта заготовки с инструментом. В данной работе также рассматривается дополнительный фактор – коэффициент внутреннего и наружного подпора.

Представляет интерес изучение влияния радиального внешнего подпора на характер распределения напряжений по объему очага деформации.

Радиальное воздействие имеет место при осадке колец, бандажей в контейнерах с целью получения заданных размеров по диаметру, осадке порошкового материала в жестких матрицах для получения полого цилиндрического изделия на заключительных стадиях процесса. При осадке поковок сложной цилиндрической формы, где действие одного элемента на смежный представляется как внешнее воздействие.

На рис. 1, 2 показано течение металла при осадке кольца при отсутствии радиального воздействия.

В работах [3, 4] представлено решение плоской осесимметричной задачи теории пластичности в напряжениях. Показано, что в условиях неоднородного пластического течения, изменение контактного напряжения по длине очага деформации имеет неравномерное распределение в зависимости от различных параметров процесса.

Целью работы является изучение напряженного состояния при внешнем воздействии радиальных нагрузок при осадке толстостенной трубы.

В работах [3, 4] определены компоненты тензора напряжений при осадке толстостенной трубы:

$$\sigma_{\rho} = - \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_0) \right] \cdot \cos A\Phi + k_0 ; \quad (1)$$

$$\sigma_z = -3 \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_0) \right] \cdot \cos A\Phi + k_0 ; \quad (2)$$

$$\tau_{\rho z} = \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho} \right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_1) \right] \cdot \sin A\Phi . \quad (3)$$

Схема осадки трубы представлена на рис. 3.

Влияние внешнего воздействия в выражениях (1)–(3) учитывается коэффициентами

$$\xi_1 \text{ и } \xi_0, \text{ при этом } \xi_0 = 1 + \frac{\sigma_0}{\beta\sigma_T}, \quad \xi_1 = 1 + \frac{\sigma_1}{\beta\sigma_T},$$

где, σ_1 и σ_0 – радиальные подпирющие напряжения, приложенные к трубе со стороны внутреннего и наружного диаметров, рис. 3.

Из работы [3] следует, что решение для напряжений (1)–(3) имеет место тогда, когда выполняются условия для функций θ и $A\Phi$:

$$\begin{aligned} \theta_{\rho\rho} + \theta_{zz} &= 0; \quad \theta_{\rho} = -A\Phi_z; \\ A\Phi_{\rho\rho} + A\Phi_{zz} &= 0; \quad \theta_z = A\Phi_{\rho}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выполняя условия (4), т. е., решая уравнения Лапласа, имеем:

$$A\Phi = AA_1 z + AA_6 \cdot \rho \cdot z = -AA_6 \cdot z \cdot (\rho - r_n);$$

$$\theta = AA_6 \cdot \frac{\rho^2}{2} - AA_6 \cdot r_n \cdot \rho - AA_6 \cdot \frac{z^2}{2},$$

где r_n – радиус нейтрального сечения.

Используя граничные условия, получим значения AA_6 :

$$AA_6 = 2 \frac{A\Phi_0}{h(r_n - r)}.$$

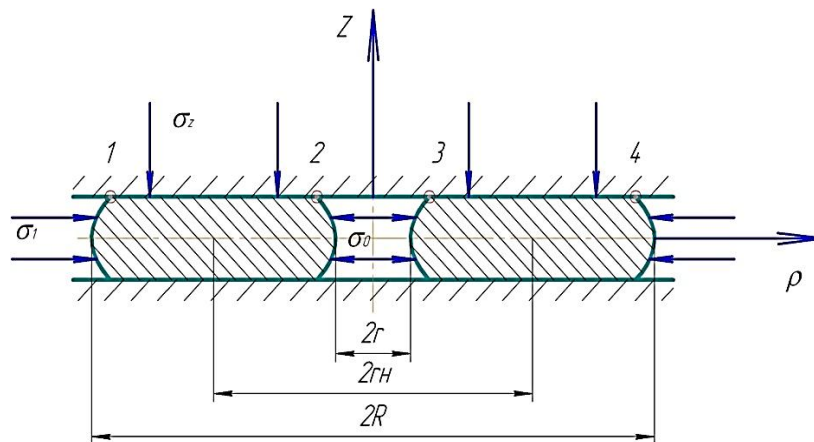


Рис. 3. Схема осадки толстостенной трубы

В выражении (3) для касательных напряжений можно определить положение нейтрального радиуса r_n [3]. Подставляя граничные условия для точек 1, 2, 3, 4 (рис. 3), имеем:

$$\tau_{k1} = k_1 \cdot \psi_1 = \frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 (R^2 - r^2)}{R(R^2 - r^2) \cos A\Phi_1} \sin A\Phi_1; \quad \tau_{k0} = k_0 \cdot \psi_0 = -\frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 (r^2 - R^2)}{r(R^2 - r^2) \cos A\Phi_0} \sin A\Phi_0;$$

$$\psi_1 = \xi_1 \operatorname{tg} A\Phi_1 \text{ или } \operatorname{tg} A\Phi_1 = \frac{\psi_1}{\xi_1}; \quad A\Phi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\psi_1}{\xi_1},$$

где $\psi_1 = f(1 - f)$;

$$\psi_0 = \xi_0 \operatorname{tg} A\Phi_0 \text{ или } \operatorname{tg} A\Phi_0 = \frac{\psi_0}{\xi_0}; \quad A\Phi_0 = \operatorname{arctg} \frac{\psi_0}{\xi_0}$$

Фиксируя функцию $A\Phi$ в точках 1, 2, 3, 4 (рис. 3), получим:

$$A\Phi_1 = -AA_6 \cdot \frac{h}{2} (R - r_n); \quad -A\Phi_0 = -AA_6 \cdot \frac{h}{2} (r - r_n).$$

Разделим одно на другое:

$$-\frac{A\Phi_1}{A\Phi_0} = \frac{R - r_n}{r - r_n}.$$

После преобразования получим выражение для определения нейтрального радиуса r_n :

$$r_n = \frac{A\Phi_0 \cdot R + A\Phi_1 \cdot r}{A\Phi_1 + A\Phi_0}. \tag{5}$$

В соответствии с выводом: $A\Phi_0 \approx \frac{\psi_0}{\xi_0}$; $A\Phi_1 \approx \frac{\psi_1}{\xi_1}$ и подставляя в (5), окончательно имеем:

$$r_n = \frac{\psi_0 \cdot \xi_1 \cdot R + \psi_1 \cdot \xi_0 \cdot r}{\psi_1 \cdot \xi_0 + \psi_0 \cdot \xi_1}. \quad (6)$$

Нейтральный радиус r_n определяется не только значениями наружного и внутреннего диаметров, но и величиной подпора ξ_1 и ξ_0 , контактным трением на наружной и внутренней боковых поверхностях ψ_1 и ψ_0 .

При $\psi_0 = \psi_1$ формула (5) принимает вид:

$$r_n = \frac{\xi_1 \cdot R + \xi_0 \cdot r}{\xi_0 + \xi_1}. \quad (7)$$

И при $\xi_0 = \xi_1$ значение нейтрального радиуса будет равно:

$$r_n = \frac{R + r}{2} = R_{cp}, \quad (8)$$

где R_{cp} – средний радиус заготовки.

Выражения (1)–(3) показывают, что в общем случае распределение напряжений носит асимметричный характер. Это наглядно представлено на рис. 4 при факторе формы $S/h = 1$ и коэффициенте трения равным 0,1; 0,3; 0,5. Пик эпюры смещается в сторону меньшего диаметра при коэффициенте трения 0,1, а при коэффициентах трения 0,3 и 0,5 пик эпюры смещается в сторону среднего радиуса [3]. С увеличением фактора формы и коэффициента трения максимальные нормальные напряжения и зона перехода касательных напряжений смещается к среднему радиусу R_{cp} .

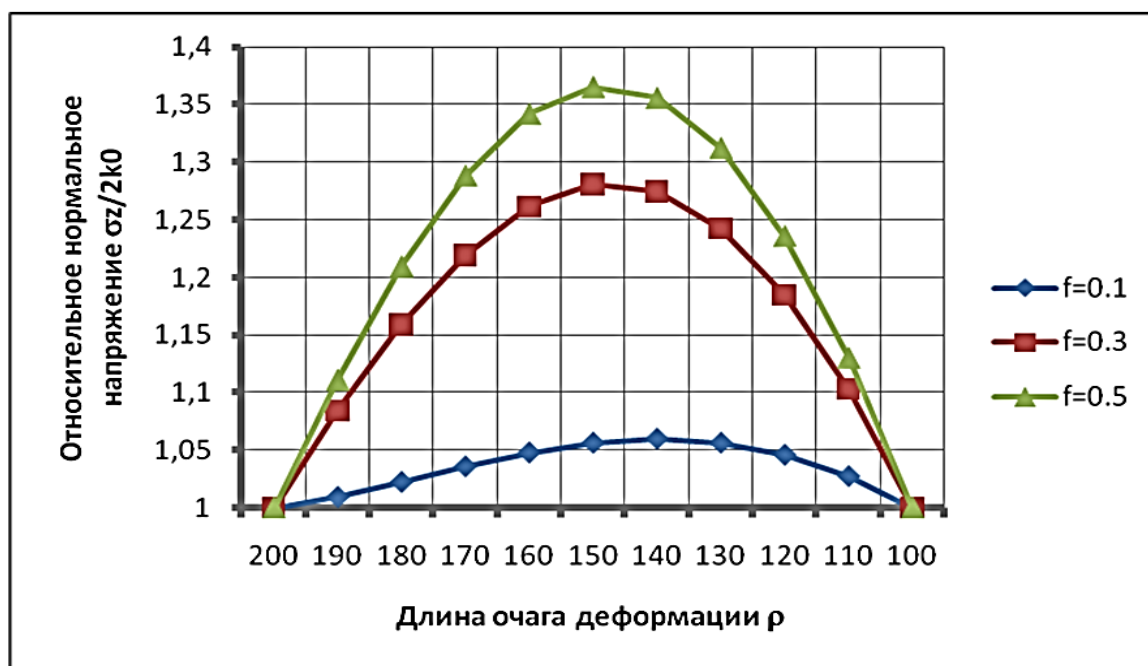


Рис. 4. Распределение относительного нормального напряжения при факторе формы $S/h = 1$; коэффициенте трения $f = 0,1; 0,3; 0,5$

Рассмотрим влияние внешнего радиального подпора ξ_1 и ξ_0 на величину и смещение нейтрального радиуса r_n .

На рис. 5 показана зависимость относительной величины нейтрального радиуса от относительного подпора, полученного на основании выражения (7).

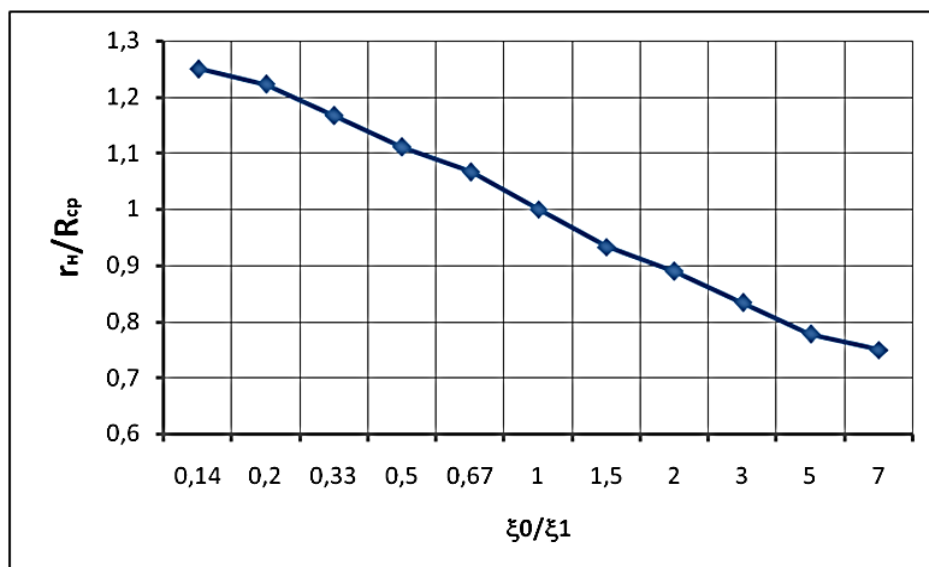


Рис. 5. Изменение относительного нейтрального радиуса в зависимости от соотношения ξ_0/ξ_1 .

При заданных значениях с увеличением внутреннего подпора $\xi_0/\xi_1 > 1$ нейтральный радиус уменьшается и смещается в направлении внутреннего радиуса, увеличивая зону течения металла в направлении внешней боковой поверхности. С увеличением внешнего подпора, $\xi_0/\xi_1 < 1$, изменение положения нейтрального радиуса изменяется противоположным образом.

Влияние внешнего радиального подпора ξ_1 и ξ_0 на контактные напряжения представлены на рис. 6, 7.

Распределение и величина контактных напряжений определяется нейтральным радиусом r_n , внешним подпором ξ_1 , ξ_0 , фактором формы S/h и коэффициентом трения f . Значение r_n входит в выражения компонентов тензора напряжений (1)–(3). С изменением r_n изменяются значения, входящие в квадратные скобки указанных формул, и аргументы тригонометрических функций. Определяющим фактором является тригонометрическая функция, линейно зависящая от нейтрального радиуса. Переход касательного напряжения через ноль определяет положение нейтрального радиуса на осаживаемой стенке трубы. Нормальное напряжение в этой зоне принимает максимальное значение.

На рис. 6 показано распределение контактных напряжений в зависимости от радиального подпора ξ_1 со стороны внешнего диаметра. С увеличением подпора увеличивается значение нормального напряжения со стороны внешнего диаметра с постепенным затуханием к противоположной стороне. Характер распределения контактных касательных напряжений другой. Следовало бы ожидать расслоения кривых и для касательных напряжений, в области данной точки, как это имеет место в работе [5]. Однако, разделение точек на графике практически не заметно. Объясняется это тем, что с увеличением ξ_1 значение в квадратной скобке в выражении (3) также увеличивается, однако значение тригонометрической функции в данной точке резко уменьшается и конечный результат для разных значений ξ_1 мало отличается друг от друга.

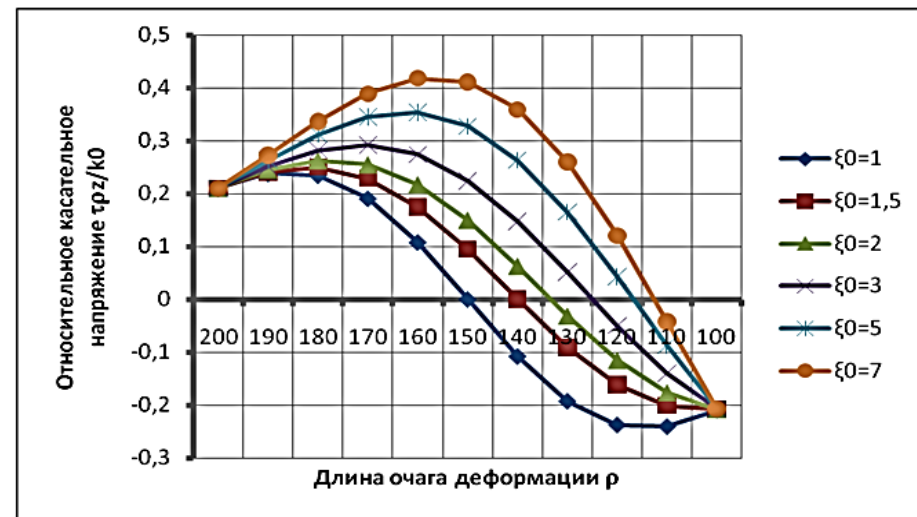
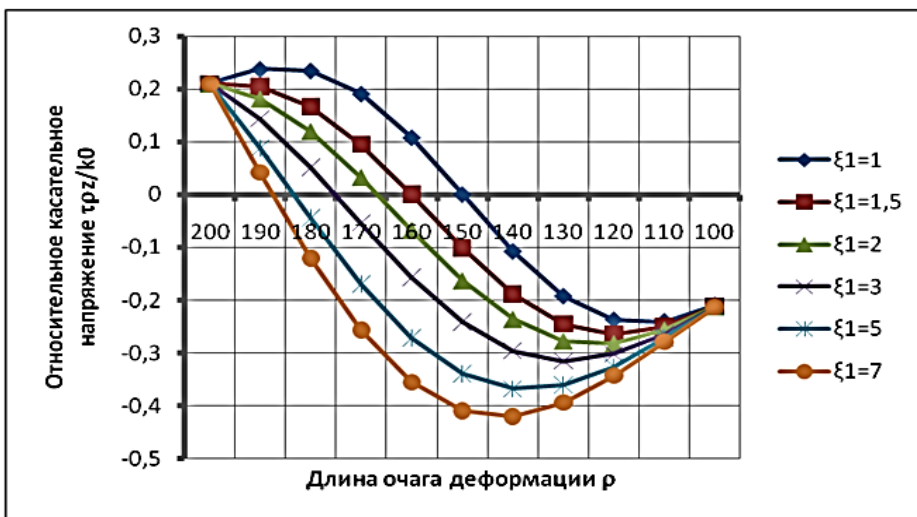
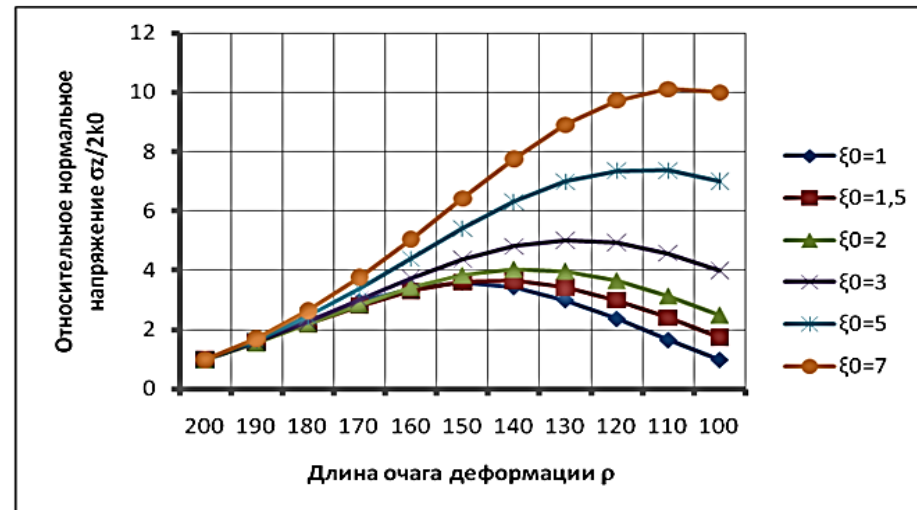
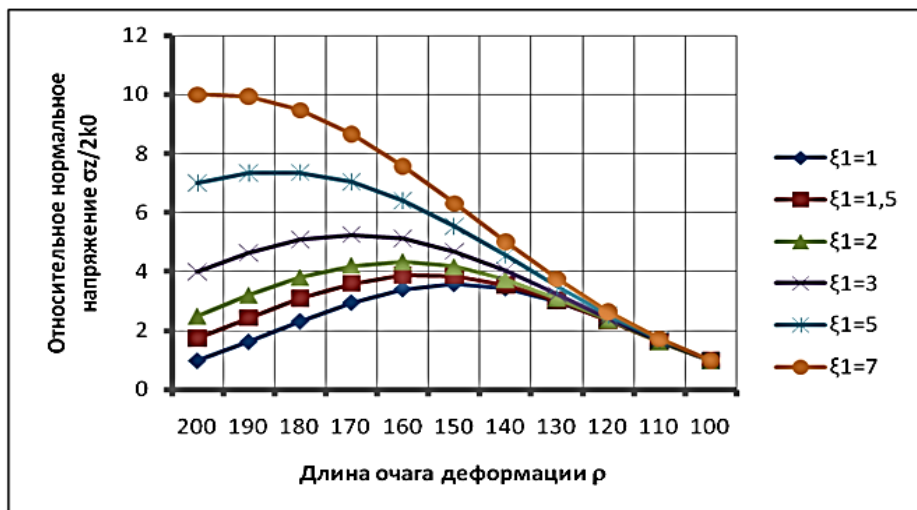


Рис. 6. Распределение относительного нормального и касательного напряжения при факторе формы $S/h = 5$, коэффициенте трения $f = 0,3$, в зависимости от радиального подпора со стороны внешнего диаметра $\xi_1 = 1...7$, $\xi_0 = 1$

Рис. 7. Распределение относительного нормального и касательного напряжения при факторе формы $S/h = 5$, коэффициенте трения $f = 0,3$, в зависимости от радиального подпора со стороны внутреннего диаметра, $\xi_0 = 1...7$, $\xi_1 = 1$

Для симметричного нагружения $\xi_0 = \xi_1 = 1$ кривая нормальных напряжений практически симметрична, а кривая касательных проходит через ноль в зоне среднего радиуса. Распределение напряжений изменяется с увеличением ξ_1 . Пик эпюры контактных нормальных напряжений смещается в сторону внешнего диаметра, точка перехода касательных напряжений также смещается в этом же направлении. Форма кривой касательных напряжений в зонах противоположных знаков разная. При смещении зоны перехода к большему диаметру кривая напряжений в данной зоне уменьшает свою кривизну. На участке большей длины обозначается пик кривой, который вслед за зоной перехода постепенно смещается в сторону внешней зоны, рис. 6.

Аналогичный характер распределения кривых наблюдается при действии подпора ξ_0 со стороны внутреннего диаметра, рис. 7.

Увеличение и смещение касается другой зоны пластического течения, в которой касательные напряжения изменили знак.

В итоге следует отметить, что предложенные решения позволяют качественно и количественно изменить напряженное состояние деформируемой толстостенной трубы с учетом основных параметров процесса, включая влияние внешнего подпора. Изменяя подпор, изменяется и распределение контактных напряжений и напряжений всего очага деформации.

ВЫВОДЫ

Анализируя вышеприведенные графики распределения контактных нормальных и касательных напряжений по длине очага деформации, можно сделать вывод, что напряженное состояние в крайних точках качественно и количественно зависит от таких параметров процесса пластического формоизменения, как: фактор формы, т. е. соотношение длины очага деформации и высоты заготовки; коэффициента трения в месте контакта заготовки с инструментом; коэффициента внутреннего и наружного подпора.

Наиболее существенное влияние оказывает коэффициент внутреннего и наружного подпора. Так, при увеличении внутреннего подпора и отсутствии наружного, течение металла происходит во внешнюю сторону, тем самым смещая положения нейтрального радиуса в сторону меньшего диаметра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория обработки металлов давлением / Тарновский И. Я., Поздеев О. А., Ганаго О. А., Колмогоров В. Л. и др. – М. : Металлургия, 1963. – 672 с.
2. Малинин Н. Н. Технологические задачи пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Высш. школа, 1979. – 119 с.
3. Чигиринський В. В. Розробка математичної моделі радіального тиску пластичного середовища при осадці полів тіл обертання / В. В. Чигиринський, А. Ю. Матюхін, В. В. Падалка // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2011. – С. 46–50.
4. Плоская задача теории пластичности в цилиндрических координатах / В. В. Чигиринский, О. М. Силенко, С. А. Силенко, А. Ю. Матюхин // Прогрессивные технологии пластической деформации. – 2009.
5. Чигиринский В. В. Исследование напряженного состояния при осадке тел вращения в условиях внешней радиальной нагрузки / В. В. Чигиринский, А. Ю. Матюхин // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 169–173.

Чигиринский В. В. – д-р техн. наук, проф, зав. каф. ОМД ЗНТУ.

Матюхин А. Ю. – аспирант, ассистент ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: mco2005@yandex.ru