

УДК 621.735.32

Панин П. М.  
Хван Д. В.  
Евдокимова Н. А.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДКЕ СО СДВИГОМ

В промышленности придается большое значение разработкам новых технологий для улучшения эксплуатационных свойств режущих и мерительных инструментов [1–3]. В связи с этим актуальным с точки зрения повышения стойкости является совершенствование технологических процессов изготовления инструментов типа плашек для нарезания резьбы на стержневых деталях (болты, шпильки и др.).

В работах [3–4] отмечено, что предварительная механо-термическая обработка (ПМТО) позволяет значительно (1,5–2 раза) увеличивать стойкость инструментов из низколегированных сталей (ШХ15, 9ХС, ХВГ) по сравнению со стойкостью, реализуемой по традиционной технологии (резка прутков на заготовки, механообработка, термообработка, финишная операция). При этом при реализации ПМТО в качестве механической обработки заготовки, как правило, используется пластическое деформирование.

В связи с этим для оптимизации процессов ПМТО необходимо знание напряженно-деформированного состояния в формоизменяемых заготовках для выявления закономерностей влияния пластических деформаций на повышение стойкости инструментов. При изготовлении плашек можно в качестве их заготовок рассматривать цилиндры сплошного сечения или кольца высотой  $l_0$ , внутренним ( $r_0$ ) и внешним ( $R_0$ ) радиусами. С точки зрения теории пластичности, а также практической возможности реализации пластической осадки будет актуальным использование в качестве заготовки указанного кольца.

Изучению напряженно-деформированного состояния при осадке колец посвящен ряд исследований, среди которых наиболее существенной с точки зрения объективности представленных результатов является работа [5]. В ней делается вывод о том, что при осадке колец внутренний и наружный его диаметры соответственно уменьшается и увеличивается.

Целью работы является получение решения задачи об осадке со сдвигом кольцевых заготовок. При этом сдвиговая деформация в заготовке реализуется посредством кручения заготовки.

На рис. 1 представлена схема деформирования заготовки 1 из упрочняющегося материала в цилиндрической системе координат  $z, \rho, \varphi$  с началом в точке  $O$ , совмещенной с центром тяжести нижнего неподвижного сечения. При этом заготовка, установленная на основании 2, нагружается перемещением пуансона 3 со скоростью  $V$  и одновременным вращением его с угловой скоростью  $\omega$  без проскальзывания относительно торца заготовки. Предполагается, что все частицы последней с одной и той же координатой  $\rho$  перемещаются от оси заготовки на одну и ту же величину  $\Delta R$ , и в связи с этим внутренний и наружный радиусы кольца увеличиваются.

Тогда компоненты скорости перемещения произвольной точки  $A$  заготовки с текущими координатами  $z, \rho, \varphi$  будут определяться по соотношениям:

$$v_z = \frac{Vz}{l}; \quad v_\rho = \frac{V\rho}{2R}; \quad v_\varphi = \frac{\omega\rho}{l}z, \quad (1)$$

где  $l = l_0 - Vt$  – текущая высота осажженной на величину  $\Delta l = Vt$  заготовки, где  $t \geq 0$  – время;  $R$  – текущий наружный радиус заготовки.

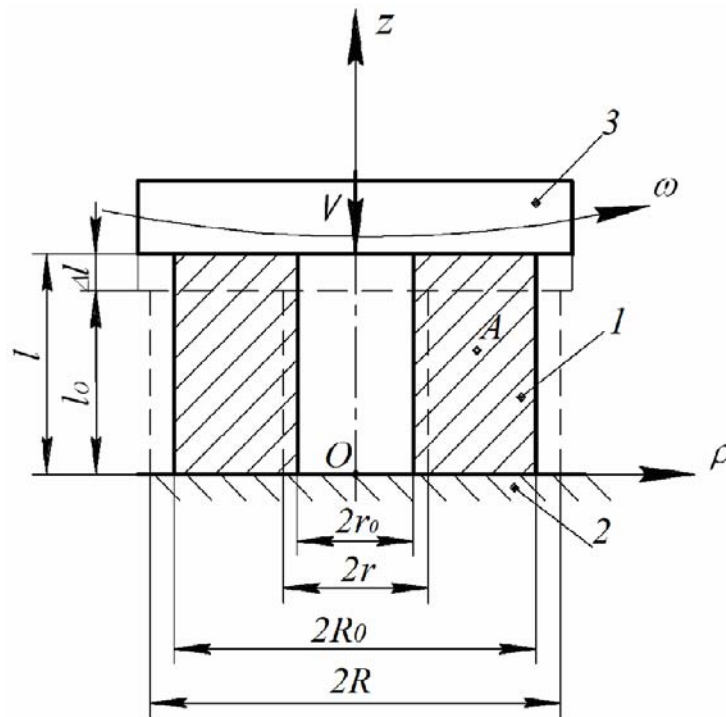


Рис. 1. Схема деформирования цилиндрической заготовки

Компоненты тензора скоростей деформации согласно [6] и (1) определяются согласно выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \xi_z = -2\xi_\rho = -2\xi_\varphi = -V/l; \\ \xi_{\varphi z} = \omega\rho/2l; \xi_{z\rho} = \xi_{z\varphi} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а интенсивность скоростей деформации с учетом этих формул будет равна:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \sqrt{V^2 + \frac{1}{3}\omega^2\rho^2}. \quad (3)$$

Степень деформации (или накопленная деформация) по определению Ильюшина А. А. в соответствии с этим выражением определяется по соотношению:

$$e = \int_0^t \dot{\varepsilon} \cdot dt = \frac{1}{V} \ln \frac{l_0}{l} \cdot \sqrt{V^2 + \frac{1}{3}\omega^2\rho^2}. \quad (4)$$

При выполнении расчетов рассмотренных кинематических параметров бывает порою удобным определять последние как функции относительной деформации  $\varepsilon = \Delta/l_0$  и сдвига на поверхности заготовки (при  $\rho = R$ )  $\gamma = \omega \cdot t \cdot R/l$ . В связи с этим представляются следующие необходимые для математических преобразований выражения:

$$l = (1 - \varepsilon) \cdot l_0; \quad \frac{\omega}{V} = \frac{\omega \cdot t \cdot l}{V \cdot t \cdot l} = \gamma(1 - \varepsilon)/R\varepsilon. \quad (5)$$

Тогда с учетом этих соотношений кинематические параметры будут равны:

$$\xi_z = -2\xi_\rho = -2\xi_\varphi = -V/(1 - \varepsilon)l_0; \quad \xi_{\varphi z} = \omega\rho/2(1 - \varepsilon)l_0; \quad (6)$$

$$\varepsilon = V\Delta/(1 - \varepsilon)l_0; \quad e = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon} \cdot \Delta, \quad (7)$$

$$\text{где } \Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\gamma^2 (1 - \varepsilon)^2}{R^2 \varepsilon^2}} \rho^2.$$

Компоненты девиатора напряжений определяются для изотропно упрочняющегося материала по уравнениям состояния [6]:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_0(e)}{\dot{\varepsilon}} \xi_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, 3; (1-z, 2-\rho, 3-\varphi)), \quad (8)$$

и дифференциальному уравнению равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\varphi}{\rho} = 0, \quad (9)$$

где  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\sigma_0(e)$  – интенсивность напряжений.

Из соотношений (6) и (8) следует равенство радиальных и окружных нормальных напряжений  $\sigma_\rho = \sigma_\varphi$ , с учетом которого на основании уравнения (9) устанавливается, что  $\sigma_\rho = \text{const}$  по всему поперечному сечению заготовки.

Так как на свободной поверхности заготовки  $\sigma_\rho = 0$ , то и по всему ее поперечному сечению следуют равенства  $\sigma_\rho = \sigma_\varphi = 0$ . В связи с этим гидростатическое давление будет равно:

$$\sigma = \sigma_z / 3, \quad (10)$$

где  $\sigma_z$  – осевое нормальное напряжение (вдоль оси  $z$ ).

В свою очередь из уравнения (8) с учетом (6), (7) и (10) получают соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\sigma_0(e)/\Delta; \\ S_{\varphi z} &= \tau = \frac{1}{3} \sigma_0(e) \gamma (1 - \varepsilon) \rho / R \varepsilon \Delta. \end{aligned} \quad (11)$$

Деформирующие нагрузки согласно этим выражениям и интегральным уравнениям будут равны:

$$\left. \begin{aligned} P &= -2\pi \int_r^R \sigma_0(e) \cdot \Delta^{-1} \rho \cdot d\rho; \\ M &= \frac{2\pi\gamma(1-\varepsilon)}{3\varepsilon \cdot R} \int_r^R \sigma_0(e) \cdot \Delta^{-1} \cdot \rho^3 d\rho, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где текущие радиусы заготовки, определенные в предположении равенства  $e_\rho = e_\varphi$  при  $\rho = R$  и условия несжимаемости материала, будут равны:

$$R = R_0 \sqrt{1/(1-\varepsilon)}; \quad r = r_0 \sqrt{1/(1-\varepsilon)}. \quad (13)$$

Для определения компонентов напряжений  $\sigma_z$  и  $\tau$  по соотношениям (11) можно воспользоваться опытной кривой течения материала  $\sigma_0 = \sigma_0(e)$ , или ее аппроксимацией, например в виде соотношения А. Надаи:

$$\sigma_0 = A(e_0 + e)^n, \quad (14)$$

где  $A, e_0, n$  – коэффициенты аппроксимации, определяемые статистической обработкой опытной кривой течения, построенной по данным испытаний на растяжение стандартных образцов [7].

При осадке заготовки без закручивания осевая нагрузка будет равна:

$$P' = -\pi R^2 \sigma_0(\bar{e}), \quad (15)$$

где  $\bar{e} = \ln \frac{1}{1-\varepsilon}$ .

Тогда с помощью функции, определяющей отношение указанных осевых сил:

$$\alpha = \frac{P}{P'} = \frac{2}{\sigma_0(\bar{e})R^2} \int_r^R \sigma_0(e) \rho \cdot \Delta^{-1} d\rho, \quad (16)$$

можно будет исследовать влияние деформации сдвига на величину усилия осадки.

Результаты исследований, представленных в работе [8], свидетельствуют об уменьшении осевой нагрузки с увеличением деформации сдвига. Такой же вывод можно сделать на основе теоретического анализа соотношения (16).

Следует отметить, что с увеличением степени упрочнения материала, характеризующегося показателем  $n$  в выражении (14), происходит повышение осевой нагрузки.

#### ВЫВОДЫ

1. Решена задача об осадке со сдвигом кольцевых заготовок с получением соотношений для расчета напряжений и деформирующих нагрузок с учетом упрочняемости материала.
2. Увеличение сдвиговых деформаций и показателя упрочнения материала соответственно понижает и увеличивает силу сжатия заготовки.
3. Полученные результаты могут быть эффективно использованы для оптимизации процесса пластической деформации заготовок режущих и мерительных инструментов в инновационных технологиях ПМТО по повышению стойкости указанных инструментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов / М. Л. Бернштейн. – М. : Металлургия, 1988. – Т. 2. – 490 с.
2. Хван Д. В. Влияние механо-термической обработки на стойкость инструментов / Д. В. Хван, А. В. Попов, А. А. Токарев // Изв. Тульского государственного университета. Секция механики деформируемого твердого тела и ОМД. – 2004. – Вып. 2. – С. 157–160.
3. Повышение стойкости режущих инструментов осадкой с кручением / А. В. Токарев, Д. В. Хван, А. А. Воропаев, В. В. Кефели // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – № 11. – С. 21–25.
4. Попов А. В. Повышение стойкости инструментальной стали Р6М5 с применением новой технологии ПМТО. «АКТ-2009. Научные исследования в области транспортных, авиационных и космических систем» / А. В. Попов. – Воронеж, 2009. – С. 356–358.
5. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М. : Машиностроение, 1974. – 380 с.
6. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
7. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение, 1984. – 110 с.
8. Хван Д. В. Технологические задачи пластического кручения / Д. В. Хван, А. Д. Хван, И. Г. Амрахов. – Воронеж : ВГУ, 2001. – 57 с.

Панин П. М. – инженер ВГТУ;  
Хван Д. В. – д-р техн. наук, проф. ВГТУ;  
Евдокимова Н. А. – студент ВГТУ.

ВГТУ – Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия.

E-mail: prmex@prmex.vorstu.ru