

УДК 621.983; 539.374

Яковлев С. С.
Трегубов В. И.**РОТАЦИОННАЯ ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА И РАЗДЕЛЕНИЕМ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ**

При изготовлении тонкостенных цилиндрических деталей различного назначения в настоящее время находят всё более широкое использование ротационная вытяжка. Для производства такого типа деталей находят успешное применение схемы ротационной вытяжки роликами с открытой и закрытой калибровкой, а также с разделением очага деформации [1–5].

Целью работы является разработка основные соотношения для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояния, силовых режимов ротационной вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей коническим роликом, выявить особенности расчета силовых режимов для 3-х роликовой схемы ротационной вытяжки цилиндрических деталей с разделением деформации.

Схема с разделением деформации имеет ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными схемами, состоящих в снижении потребных деформирующих сил (при прочих равных условиях), достижении более высоких степеней деформации за один проход, что позволяет интенсифицировать процесс ротационной вытяжки. Сущность указанной схемы состоит в том, что суммарная деформация разделяется между роликами или группой роликов по определённой зависимости (рис. 1).

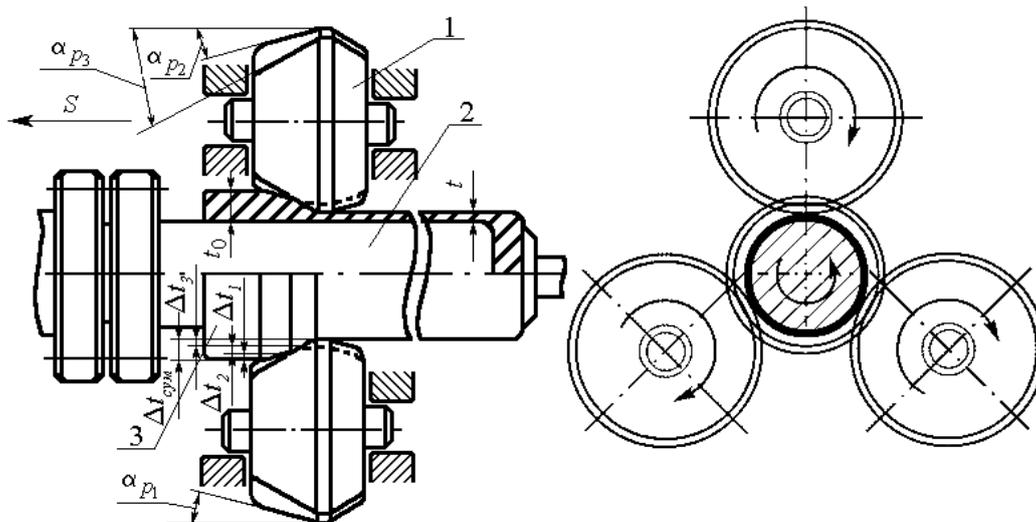


Рис. 1. Трехроликовая схема ротационной вытяжки цилиндрических деталей с разделением деформации при радиальном смещении роликов:

1 – ролик; 2 – оправка; 3 – деталь

Разделение деформации осуществляется взаимным смещением роликов либо в осевом и радиальном направлении, либо смещением только в радиальном направлении, при этом используются ролики с различным профилем [4, 5].

Рассмотрен процесс ротационной вытяжки тонкостенной трубной заготовки из анизотропного материала коническими роликами по прямому способу (рис. 2). За один оборот заготовки ролик переместился на величину рабочей подачи S . При подаче ролика на величину S фактическая подача будет $S_{\phi} = S t_k / t_0$. Это справедливо в предположении, что вдоль осевой реализуется плоская деформация.

Из геометрических соображений нетрудно определить максимальный угол контакта θ_ϕ с заготовкой:

$$\theta_\phi = \left[\frac{2S_\phi R_p \operatorname{tg} \alpha_p}{R_\phi (R_\phi + R_p)} \right]^{1/2}, \text{ если } S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p \leq \Delta t; \quad (1)$$

$$\theta_\phi = \left[\frac{2R_p \Delta t}{R_\phi (R_\phi + R_p)} \right]^{1/2}, \text{ если } S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p \geq \Delta t. \quad (2)$$

Заметим, что выражения (1) и (2) получены с учетом того, что величины Δt и S_ϕ малы по сравнению с величиной радиуса ролика R_p .

Угол θ_ϕ зависит от фактической подачи S_ϕ , изменения толщины стенки детали Δt , радиусов ролика R_p и заготовки R_ϕ и формы ролика (угла конусности ролика α). Максимальная протяженность контакта ролика с заготовкой в осевом направлении $l = \Delta t \operatorname{ctg} \alpha_p + S_\phi$. Ширина зоны контакта в каждом сечении может быть определены по формуле $b = R_\phi \sin \theta_\phi$.

Пластическая деформация под роликом проходит в сравнительно короткий промежуток времени $\Delta t_{\text{сп}}$, необходимый для прохождения зоны контакта материала заготовки с роликом. В течение этого промежутка времени материал течет под роликом в осевом направлении. Заметим, что угол контакта материала заготовки с роликом в основном постоянный и переменный в начальном и конечном участках очага деформации.

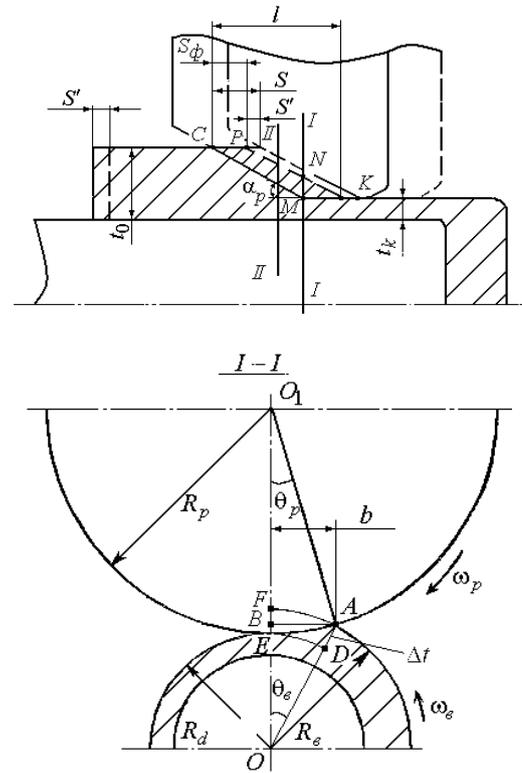


Рис. 2. Схема очага деформации при ротационной вытяжке

Рассмотрим вопрос о распределении скоростей течения материала в очаге деформации при установившемся деформировании. Скорость вдавливания ролика в заготовку определяется в сечении заготовки, проведенном под углом θ к линии центров:

$$V_R = R_\phi \theta (\omega_p + \omega_\phi),$$

где ω_p – угловая скорость ролика; $\omega_p = \omega_\phi R_\phi / R_p$; ω_ϕ – угловая скорость заготовки; $\omega_\phi = 2\pi n$; n – частота вращения шпинделя.

В цилиндрической системе координат ρ, θ, z , связанной с заготовкой, в зоне контакта ролика с металлом в каждом сечении $z = \text{const}$ в очаге деформации радиальная скорость:

$$V_{rk} = -V_R \cos \theta.$$

Запишем радиальную скорость в пластической области очага деформации в виде:

$$V_r = -R_\phi \theta (\omega_p + \omega_\phi) \frac{r - r_0}{r_k - r_0} \cos \theta,$$

где r_k – радиус контактной поверхности в цилиндрической системе координат в плоскости $z = const$.

Примем, что в пластической области в цилиндрической системе координат реализуется квазиплоская деформация, т. е.: $\xi_\theta = 0$; $\xi_{r\theta} \neq 0$; $\xi_{z\theta} \neq 0$.

Уравнение линии контакта в цилиндрической системе координат в сечении $z = const$ имеет вид:

$$r_k = (R_d + z \operatorname{tg} \alpha_p) / \cos \theta.$$

Приведем окончательные выражения для определения радиальной V_r , тангенциальной V_θ и осевой V_z скоростей течения материала:

$$\begin{aligned} V_r &= -(R_d + S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p + z \operatorname{tg} \alpha_p) \theta (\omega_p + \omega_\epsilon) \frac{r - r_0}{R_d + z \operatorname{tg} \alpha_p - r_0}; \\ V_\theta &= -\omega_\epsilon r + (\omega_p + \omega_\epsilon) \frac{R_d + S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p + z \operatorname{tg} \alpha_p}{R_d + z \operatorname{tg} \alpha_p - r_0} (r - r_0) \frac{\theta^2}{2}; \\ V_z &= \theta (\omega_p + \omega_\epsilon) \left[z + (S_\phi + r_0 \operatorname{ctg} \alpha_p) \ln \frac{z \operatorname{tg} \alpha_p + R_d - r_0}{R_d - r_0} \right] - \\ &\quad - (R_d + S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p) \operatorname{ctg} \alpha_p \left[\frac{t_0 (t_k + S_\phi)}{\left(t_k + S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p \frac{\theta}{\theta_\epsilon} \right)^2} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что последние выражения получены, учитывая малость угла θ по сравнению с (1).

Компоненты скоростей деформаций вычисляются по известным скоростям течения материала в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \xi_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \xi_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r}; \quad \xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\xi_r - \xi_\theta; \\ \xi_{r\theta} &= \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta}; \quad \xi_{\theta z} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial z}; \quad \xi_{rz} = \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}. \end{aligned} \quad (4)$$

Материал трубной заготовки примем жесткопластическим, несжимаемым, цилиндрически ортотропным, подчиняющимся условию пластичности Мизеса-Хилла и ассоциированному закону пластического течения.

Допускается, что в очаге пластической деформации реализуется квазиплоское течение материала, т. е.:

$$\xi_\theta = 0; \quad \xi_{\theta r} \neq 0; \quad \xi_{\theta z} \neq 0; \quad \sigma_\theta = \frac{F \sigma_r + H \sigma_z}{F + H}; \quad \xi_r = -\xi_z.$$

Введя характеристики анизотропии c_{zr} , $c_{r\theta}$ и $c_{z\theta}$ в условиях плоского деформированного состояния:

$$c_{zr} = 1 - \frac{M(H + F)}{2(FG + GH + HF)};$$

$$c_{r\theta} = 1 - \frac{L(H+G)}{2(FG+GH+HF)}; \quad c_{z\theta} = 1 - \frac{N(F+G)}{2(FG+GH+HF)},$$

а также учитывая, что:

$$F = \frac{1}{\sigma_{s\theta}^2(1+R_\theta)}; \quad R_\theta = \frac{H}{F}; \quad R_z = \frac{H}{G}; \quad \frac{G}{F} = \frac{R_\theta}{R_z};$$

$$2M = \frac{1}{S^2} = \frac{1}{\tau_{s zr}^2}; \quad 2N = \frac{1}{T^2} = \frac{1}{\tau_{s z\theta}^2}; \quad 2L = \frac{1}{R^2} = \frac{1}{\tau_{s\theta r}^2},$$

выражение для определения интенсивности скорости деформации ξ_i примет вид:

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

Здесь введены следующие обозначения: F, G, H, L, M, N – параметры анизотропии; R_θ, R_z – коэффициенты анизотропии; $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$ – осевые, окружные, радиальные и сдвиговые напряжения соответственно; $\xi_z, \xi_\theta, \xi_r, \xi_{z\theta}, \xi_{\theta r}, \xi_{rz}$ – скорости деформации в соответствующих направлениях.

Можно показать, что в принятых условиях деформирования уравнения пластического течения, устанавливающие связи между напряжениями и скоростями деформаций, для анизотропного тела запишутся в виде:

$$\sigma_z - \sigma = 2\mu_z \xi_z; \quad \sigma_r - \sigma = -2\mu_r \xi_z; \quad \sigma_\theta - \sigma = -2\mu_\theta \xi_z; \quad (5)$$

$$\tau_{z\theta} = \mu_{z\theta} \xi_{z\theta}; \quad \tau_{\theta r} = \mu_{\theta r} \xi_{\theta r}; \quad \tau_{rz} = \mu_{rz} \xi_{rz},$$

где σ – среднее напряжение;

$$\mu_{z\theta} = \frac{\tau_{s z\theta}^2}{2\tau_{s zr}} \frac{1}{\dot{\psi}}; \quad \mu_{\theta r} = \frac{\tau_{s \theta r}^2}{2\tau_{s zr}} \frac{1}{\dot{\psi}}; \quad \mu_{rz} = \frac{\tau_{s rz}}{2\dot{\psi}};$$

$$\mu_z = \frac{1}{3} \frac{(2 + R_\theta)(1 - c_{zr})\tau_{s zr}}{1 + R_\theta} \frac{1}{\dot{\psi}}; \quad \mu_r = -\frac{1}{3} \frac{(2R_\theta + 1)(1 - c_{zr})\tau_{s zr}}{1 + R_\theta} \frac{1}{\dot{\psi}};$$

$$\mu_\theta = -\frac{1}{3} \frac{(1 - R_\theta)(1 - c_{zr})\tau_{s zr}}{1 + R_\theta} \frac{1}{\dot{\psi}}; \quad \dot{\psi} = \frac{\dot{\lambda}}{2\tau_{s zr}};$$

$$\frac{\tau_{s \theta r}}{\tau_{s zr}} = \sqrt{\frac{R_\theta(R_z + 1)(1 - c_{zr})}{R_z(R_\theta + 1)(1 - c_{r\theta})}}; \quad \frac{\tau_{s z\theta}}{\tau_{s zr}} = \sqrt{\frac{(R_z + R_\theta)(1 - c_{zr})}{R_z(R_\theta + 1)(1 - c_{z\theta})}};$$

$$\dot{\lambda} = 2\tau_{s zr} \left[(1 - c_{zr})\xi_z^2 + \frac{1}{4}\xi_{zr}^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\tau_{s \theta r}}{\tau_{s zr}} \right)^2 \xi_{\theta r}^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\tau_{s z\theta}}{\tau_{s zr}} \right)^2 \xi_{z\theta}^2 \right]^{1/2}.$$

Разрешив выражения (5) относительно компонент тензора напряжений, получим:

$$\sigma_z = \sigma + 2\mu_z \xi_z; \quad \sigma_r = \sigma + 2\mu_r \xi_z; \quad \sigma_\theta = \sigma + 2\mu_\theta \xi_z; \quad (6)$$

$$\tau_{z\theta} = \mu_{z\theta} \xi_{z\theta}; \quad \tau_{\theta r} = \mu_{\theta r} \xi_{\theta r}; \quad \tau_{rz} = \mu_{rz} \xi_{rz}.$$

Подставив уравнения пластического течения, устанавливающие связи между напряжениями и скоростями деформаций (6), в уравнения равновесия в цилиндрической системе координат, получим систему уравнений для определения среднего напряжения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial r} + 2 \frac{\partial(\mu_r \xi_z)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\mu_{r\theta} \xi_{r\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\mu_{rz} \xi_{rz})}{\partial z} + \frac{2\xi_z}{r} (\mu_r - \mu_\theta) &= 0; \\ \frac{\partial(\mu_{r\theta} \xi_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + 2 \frac{1}{r} \frac{\partial(\mu_\theta \xi_z)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\mu_{\theta z} \xi_{\theta z})}{\partial z} + 2\mu_{\theta r} \frac{\xi_{\theta r}}{r} &= 0; \\ \frac{\partial(\mu_{zr} \xi_{zr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\mu_{z\theta} \xi_{z\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} + 2 \frac{\partial(\mu_z \xi_z)}{\partial z} + \mu_{zr} \frac{1}{r} \xi_{zr} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Записав систему уравнений в виде конечных разностей и разрешив каждое из них относительно среднего напряжения, получим выражения для определения величины среднего напряжения $\sigma(m, n)$.

Известно, что на границе входа материала в очаг пластической деформации при $r = R_\theta$, $\theta = 0$ величина осевого напряжения $\sigma_z = 0$. Это условие позволяет определить распределение величин среднего напряжения $\sigma(m, n)$ на входе материала в очаг пластической деформации и напряжений σ_r , σ_θ , σ_z и $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$, $\tau_{r\theta}$, предварительно вычислив компоненты скоростей деформации по выражениям (6), среднюю величину накопленной интенсивности деформации в очаге пластической деформации:

$$\varepsilon_{i\text{ср}} = \frac{1}{N_z} \sum_{i=1}^{N_z} \xi_{iz} \Delta t_{об i},$$

где $\Delta t_{об i}$ – время обработки материальной точки в очаге деформации на i -м обороте шпинделя; N_z – количество оборотов шпинделя, необходимое для прохождения материальной точки от входа в локальный очаг пластической деформации до его выхода.

Уравнение траектории для материальной точки при стационарном течении в локальном очаге пластической деформации при ротационной вытяжке коническим роликом запишется следующем образом:

$$\frac{dr}{V_r} = \frac{r d\theta}{V_\theta} = \frac{dz}{V_z}.$$

Имея в своем распоряжении кривую упрочнения материала, можно найти среднюю величину сопротивления материала пластическому деформированию в очаге деформации по формуле:

$$\sigma_{s\theta\text{ср}} = \sigma_{0,2\theta} + Q(\varepsilon_{i\text{ср}})^n;$$

интенсивности напряжения:

$$\sigma_{i\text{ср}} = \sigma_{s\theta\text{ср}} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{R_z(1+R_\theta)}{R_z + R_\theta + R_z R_\theta}},$$

а также величины сопротивления материала пластическому деформированию при сдвиге:

$$\tau_{srz\text{ср}} = \frac{\sigma_{s\theta\text{ср}}}{2} (1+R_\theta) \sqrt{\frac{R_z}{R_\theta(R_\theta + R_z + 1)(1-c_{zr})}}; \quad \tau_{sz\theta\text{ср}} = \frac{\sigma_{s\theta\text{ср}}}{2} \sqrt{\frac{(1+R_\theta)(R_z + R_\theta)}{R_\theta(R_\theta + R_z + 1)(1-c_{z\theta})}};$$

$$\tau_{sr\theta\text{ср}} = \frac{\sigma_{s\theta\text{ср}}}{2} \sqrt{\frac{(1+R_\theta)(R_z + 1)}{(R_\theta + R_z + 1)(1-c_{r\theta})}},$$

где $\sigma_{0,2\theta}$ и Q , n – условный предел текучести и константы кривой упрочнения исследуемого материала.

Информация о среднем напряжении и скоростях деформации вместе с кривой упрочнения материала позволяет рассчитать напряженное состояние в каждой точке очага деформации. Все перечисленные выше характеристики напряженного и деформированного состояний вычисляются численно с использованием метода конечных разностей.

Составляющие сил ротационной вытяжки определяются по формулам:

радиальная $P_R = \iint \sigma_R r_k d\theta \sin \theta dz;$ (8)

тангенциальная $P_\tau = \iint \sigma_\tau|_{\theta=\theta_0} dr \cos \theta_0 dz;$ (9)

осевая $P'_z = \int_{R_d}^{r_k} \int_0^{\theta_0} \sigma_z(r, \theta) r dr d\theta;$ (10)

где $\sigma_\tau = \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta + \tau_{r\theta} \sin 2\theta;$

$\sigma_R = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta - \tau_{r\theta} \sin 2\theta; \quad \sigma'_z = \sigma_z.$

С учетом составляющей силы трения осевая сила равна:

$P_z = P'_z + \mu_o P_R,$ (11)

где μ_o – коэффициент трения между поверхностями заготовки и оправки.

На рис. 1 и 3 представлены схемы ротационной вытяжки с разделением деформации путем радиального смещения трех роликов, установленных в одной плоскости, имеющих различные углы рабочего конуса. Разделение деформации при такой схеме достигается установкой роликов с различной величиной зазора от оправки, причем ролик с наименьшим углом устанавливается с наибольшим зазором, а ролик, имеющий наибольший угол в комплекте, устанавливается с зазором, равным толщине стенки готовой детали на обрабатываемом участке.

При такой установке деформирующие ролики при ротационной вытяжке образуют три последовательно расположенных неразрывных участка деформации, наклоненных к оси детали под различными углами. Деформирование на начальном участке осуществляется роликом с минимальным углом, а на последнем участке – роликом с максимальным углом. Такой порядок расположения очагов деформации позволяет ограничить образование напльва (α_{p1}), обеспечить более высокую точность диаметральных размеров изготавливаемых деталей (α_{p3}).

Важным условием обеспечения высокой точности при использовании схемы (рис. 3) является обеспечение равновесия радиальных сил:

$P_{R1} = P_{R2} = P_{R3}.$ (12)

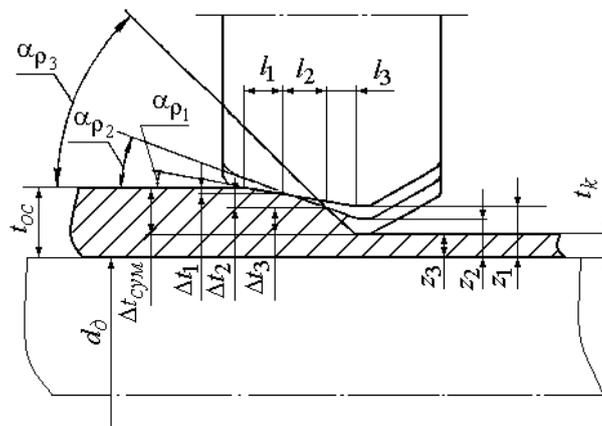


Рис. 3. Схема очага деформации при ротационной вытяжке деталей тремя роликами, смещенными в радиальном направлении

Приведенные выше соотношения позволяют рассчитать распределение суммарной степени деформации ε ($\varepsilon = 1 - t_k / t_0$) между роликами ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) с учетом неравномерного распределения давления на контактной поверхности ролика и заготовки, геометрических параметров используемых роликов и трубной заготовки, технологических параметров процесса, величины проекции поверхности контакта заготовки и ролика на площадь с нормалью в радиальном направлении и упрочнения материала детали на соответствующем участке деформирования.

Условие (12) не разрешается в явном виде относительно величин степеней деформации на первом ε_1 и втором ролике ε_2 , поэтому искомые величины устанавливаются путем численных расчетов по этому условию методом последовательных приближений с учетом соотношения:

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3).$$

Приближенная методика разделения деформации между роликами для трехроликовой схемы деформирования рассмотрена в работе [4].

Величина радиальной составляющей силы в этом случае определяется по выражению (11), тангенциальная – по формуле:

$$P_\tau = P_{\tau 1} + P_{\tau 2} + P_{\tau 3}, \quad (13)$$

где $P_{\tau 1}, P_{\tau 2}, P_{\tau 3}$ – тангенциальные составляющие сил на первом, втором и третьем роликах соответственно;

$$P_{\tau 1} = \iint \sigma_{\tau 1}|_{\theta=\theta_{e1}} dr \cos \theta_{e1} dz; \quad P_{\tau 2} = \iint \sigma_{\tau 2}|_{\theta=\theta_{e2}} dr \cos \theta_{e2} dz;$$

$$P_{\tau 3} = \iint \sigma_{\tau 3}|_{\theta=\theta_{e3}} dr \cos \theta_{e3} dz,$$

где $\theta_{e1}, \theta_{e2}, \theta_{e3}$ – угол контакта заготовки с первым, вторым и третьим роликами; $\sigma_{\tau 1}, \sigma_{\tau 2}, \sigma_{\tau 3}$ – тангенциальные напряжения на первом, втором и третьем роликах соответственно.

Осевая сила на суппорт стана ротационной вытяжки вычисляется по выражению:

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3}, \quad (14)$$

где P_{z1}, P_{z2}, P_{z3} при $z = 0$ – осевые составляющие сил на первом, втором и третьем роликах соответственно;

$$P_{z1} = \int_{r_0}^{r_{k1}} \int_0^{\theta_{e1}} \sigma_{z1}(r, \theta) r dr d\theta + \mu_o P_{R1}; \quad P_{z2} = \int_{r_0}^{r_{k2}} \int_0^{\theta_{e2}} \sigma_{z2}(r, \theta) r dr d\theta + \mu_o P_{R2};$$

$$P_{z3} = \int_{r_0}^{r_{k3}} \int_0^{\theta_{e3}} \sigma_{z3}(r, \theta) r dr d\theta + \mu_o P_{R3},$$

где $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}, \sigma_{z3}$ – осевые напряжения на первом, втором и третьем роликах на выходе из очага деформации при $z = 0$ соответственно.

Выполнено сопоставление результатов расчетов силовых параметров процесса ротационной вытяжки роликами открытой калибровки и по схеме с разделением очага пластической деформации. В табл. 1 и 2 приведены результаты расчета распределения суммарной степени деформации по роликам при ротационной вытяжке цилиндрических деталей из стали

12Х3ГНМФБА по 3-роликовой схеме деформирования с разделением очага пластической деформации по выражению (12) и по приближенной методике, изложенной в работе [5] при различных сочетаниях углов конусности роликов (α_{p1} , α_{p2} , α_{p3}). Расчеты выполнены для ротационной вытяжки цилиндрических деталей из трубной заготовки с наружным диаметром $D_0 = 116,2$ мм, и толщиной стенки трубы $t_0 = 6,05$ мм роликами диаметром $D_p = 280$ мм.

Таблица 1

Распределение суммарной степени деформации по роликам при ротационной вытяжке цилиндрических деталей из стали 12Х3ГНМФБА по трехроликовой схеме деформирования с разделением очага пластической деформации ($\alpha_1 = 10^\circ$; $\alpha_2 = 20^\circ$; $\alpha_3 = 30^\circ$)

Суммарная степень на роликах ε_{ip}	Распределение суммарной степени деформации по роликам, %					
	по существующей методике			по условию (2.126)		
	20	40	60	20	40	60
ε_{1p}	4,7	9,4	14,1	5,4	10,6	15,5
ε_{2p}	7,1	14,9	23,6	7,6	15,2	23,7
ε_{3p}	9,6	22,1	39	8,4	20,8	37,7

Таблица 2

Распределение суммарной степени деформации по роликам при ротационной вытяжке цилиндрических деталей из стали 10 по трехроликовой схеме деформирования с разделением очага пластической деформации ($\alpha_{p1} = 20^\circ$; $\alpha_{p2} = 25^\circ$; $\alpha_{p3} = 30^\circ$)

Суммарная степень на роликах ε_{ip}	Распределение суммарной степени деформации по роликам, %					
	по существующей методике			по условию (2.126)		
	20	40	60	20	40	60
ε_{1p}	5,90	11,79	17,69	6,89	12,94	19,78
ε_{2p}	7,09	15,14	24,33	6,72	14,99	24,40
ε_{3p}	8,50	19,84	35,78	7,87	18,84	34,02

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что максимальная величина расхождения результатов расчетов степеней деформации по роликам, вычисленная из условия равенства радиальных проекций площадей контактов роликов с заготовкой по выражению (12) и условия равенства радиальных составляющих сил, не превышает 10 %.

На рис. 4 и 5 представлены графические зависимости изменения относительных величин радиальной $\bar{P}_R = P_R / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2\theta}]$, тангенциальной $\bar{P}_\tau = P_\tau / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2\theta}]$ и осевой $\bar{P}_z = P_z / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2\theta}]$ составляющих сил от степени деформации ε при ротационной вытяжке по 3-роликовой схеме ротационной вытяжки с разделением деформации цилиндрических деталей из стали 12Х3ГНМФБА при фиксированных значениях рабочей подачи S и углов конусности роликов (α_{p1} , α_{p2} и α_{p3}). Точками обозначены результаты экспериментальных исследований.

Расчеты выполнены для трубной заготовки из стали 12Х3ГНМФБА с наружным радиусом $R_g = 64,15$ мм, толщиной стенки трубы $t_0 = 6,05$ мм; диаметром ролика $D_p = 280$ мм; частотой вращения шпинделя $n = 75$ мин⁻¹; $\mu_0 = 0,15$.

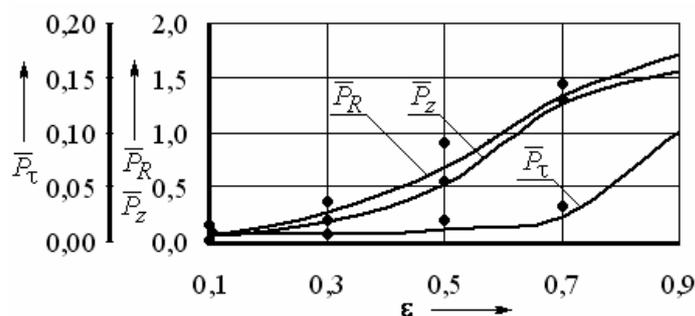


Рис. 4. Графические зависимости изменения \bar{P}_R , \bar{P}_τ , \bar{P}_Z от ε для стали 12ХЗГНМФБА ($S = 1$ мм/об; $\alpha_{p1} = 10^\circ$, $\alpha_{p2} = 20^\circ$; $\alpha_{p3} = 30^\circ$)

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показывает, что при обработке деталей по схеме с разделением деформации радиальная P_R и осевая P_Z силы имеют меньшие значения по сравнению с обработкой указанных деталей по однороликовой схеме обработки. Значения тангенциальной силы P_τ не имеют больших расхождений при используемых схемах деформирования. Установлено, что ротационная вытяжка с использованием трёхроликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных P_R сил деформирования на 25...30 % по сравнению с аналогичной схемой обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной P_τ составляющей силы ротационной вытяжки практически не зависит от используемой схемы обработки.

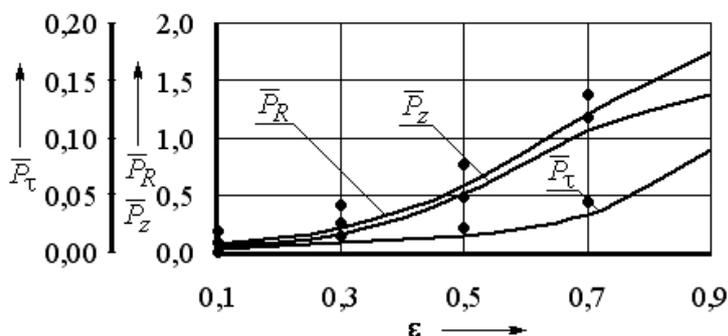


Рис. 5. Графические зависимости изменения \bar{P}_R , \bar{P}_τ , \bar{P}_Z от ε для стали 12ХЗГНМФБА ($S = 1$ мм/об; $\alpha_{p1} = 20^\circ$; $\alpha_{p2} = 25^\circ$; $\alpha_{p3} = 30^\circ$)

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с увеличением степени деформации относительные величины радиальных \bar{P}_R , осевых \bar{P}_Z и тангенциальных \bar{P}_τ составляющих сил интенсивно растут. Установлено, что с увеличением рабочей подачи S все три относительные составляющие сил возрастают. Заметим, что изменение условий трения на контактной поверхности оправки и заготовки существенно влияет на относительную величину осевой силы \bar{P}_Z . С ростом коэффициента трения на оправке μ_o величина относительной силы \bar{P}_Z возрастает.

Экспериментальные исследования ротационной вытяжки производилась на 3-х роликовом станке модели В-280М. Стан оснащен 3-х роликовой кареткой с гидравлическим приводом осевого перемещения. Деформирующие ролики расположены через 120° по периметру окружности. В процессе обработки деталей производилась регистрация замеров трех составляющих сил ротационной вытяжки: радиальной P_R , осевой P_Z и тангенциальной P_τ . Тангенциальная сила P_τ определялась косвенным путем по замерам разности мощностей

потребляемой электроприводом при обработке детали и при холостом вращении оправки с деталью. Для замеров осевой P_z и радиальной P_R нагрузок при ротационной вытяжке применительно к станку В-280М были разработаны и изготовлены гидроподушки.

Заготовки были подвергнуты ротационной вытяжке с различными степенями деформации в диапазоне от 30 до 60 % и величинами рабочей подачи в диапазоне от 0,5 до 1 мм/об.

Результаты экспериментальных работ показали, удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных значений сил, не превышающую 10 %. Экспериментально установлено, что ротационная вытяжка с использованием трёхроликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных и осевых сил деформирования на 25...30 % по сравнению с аналогичными схемами обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной составляющей силы ротационной вытяжки не зависит от используемой схемы обработки.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель операции ротационной вытяжки с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных материалов.

2. Установлено, что ротационная вытяжка с использованием трёхроликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных P_R сил деформирования на 25...30 % по сравнению с аналогичной схемой обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной P_τ составляющей силы ротационной вытяжки практически не зависит от используемой схемы обработки.

Работа выполнена по аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)» и гранту РФФИ № 05-01-96705.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М. А. Гредитор. – М. : Машиностроение, 1971. – 239 с.
2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н. И. Могильный. – М. : Машиностроение, 1983. – 190 с.
3. Белов Е. А. Ротационная вытяжка на специализированном оборудовании / Е. А. Белов, Л. Г. Юдин ; [под ред. А. Д. Матвеева; ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) и др.] // Ковка и штамповка : справочник. Том 4. Листовая штамповка. – М. : Машиностроение, 1987. – С. 234–257.
4. Трегубов В. И. Ротационная вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из труб на специализированном оборудовании / В. И. Трегубов. – Тула : ТулГУ, Тульский полиграфист, 2002. – 148 с.
5. Пат. 2106217 С1 Российская Федерация. Способ ротационной вытяжки полых осесимметричных деталей / Белов Е. А., Хитрый А. А., Евсеева Н. В., Ерохин В. Е. и др. – 10.03.98.
6. Уэльс С. Н. Наплыв и увеличение диаметра при обкатке трубчатых заготовок / С. Н. Уэльс; [пер. с англ.] // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. – М. : Изд. иностр. лит. – 1968. – Т. 90. – № 1. – Серия В. – С. 63–71.
7. Яковлев С. С. Новый подход к анализу процесса ротационной вытяжки цилиндрических деталей из трубных заготовок / С. С. Яковлев, В. И. Трегубов, А. Е. Белов / Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. – 2003. – Вып. 1. – С. 13–26.

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ТГУ;

Трегубов В. И. – д-р тех. наук, проф., первый зам. ген. директора ФГУП «ГППП «Сплав».

ТГУ – Тульский государственный университет, г. Тула;

ФГУП «ГППП «Сплав» – Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственное научно-производственное предприятие «Сплав», г. Тула.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru