



Заданный диаметр обработанного отверстия

$$d_{\text{отв}} = D_k - \Delta, \quad (1)$$

где  $D_k$  – диаметр ленточки дорна 4;  $\Delta$  – усадка отверстия.

$$\Delta = 2y - 2h_b + U, \quad (2)$$

где  $y$  – упругая деформация дорна ( $y = 0$ );  $h_b$  – высота волны внеконтактной деформации;  $U$  – величина упругого восстановления диаметра отверстия

$$U = \left(1 - \frac{W_{\text{ос}}}{W}\right) (a - R_{z_0}), \quad (3)$$

где  $W_{\text{ос}}$  – остаточная деформация;  $W$  – общая деформация;  $a$  – номинальный натяг дорна;  $R_{z_0}$  – предварительная высота шероховатости перед дорнованием.

При деформирующем протягивании дорнованием имеет место сосредоточенное по кольцу давление аналогичное раздаче толстостенной трубы равномерно распределенным внутренним давлением, где по А.А. Ильюшину отношение остаточной деформации к общей [3]

$$\frac{W_{\text{ос}}}{W} = 1 - \frac{\lambda_1}{(1 - (d_0 / D_0)^2)} \left[ 1 - \frac{r_0^2}{r_T^2} - \frac{r_0^2}{r_T^2} \ln \frac{r_0^2}{r_T^2} \right], \quad (4)$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия перед дорнованием,  $r_0 = d_0/2$ ;  $D_0$  – наружный диаметр толстостенной трубы, примем  $D_0 = \infty$  при бесконечной толщине стенки;  $r_T$  – радиус окружности, разделяющей упругую и пластическую зоны в сечении трубы;  $\lambda_1 = 1 - \frac{1}{3G} \frac{d\sigma_i}{de_i}$ ;  $G$  – модуль сдвига;  $d\sigma_i/de_i$  – тангенс угла наклона касательной к кривой

$\sigma_i = \sigma_i(e_i)$  при растяжении в точке, соответствующей данным значениям деформации  $e_i$  и напряжения  $\sigma_i$ . Преобразуя выражение (4) к виду  $G = E/2(1 + \mu')$ . Кривая течения при растяжении может быть выражена уравнением  $\sigma = B' + ce^n$ , отсюда  $d\sigma/de = nce^{n-1}$ .

Степень деформации на радиусе  $r_0 = d_0/2$

$$e = (a - R_{z_0})/d_0. \quad (5)$$

При пластической деформации к виду  $\mu' = 0,5$ ,  $G = E/3$ ;  $\lambda_1 = 1 - \frac{nc}{E} \left( \frac{d_0}{a - R_{z_0}} \right)^{n-1}$ .

Радиус окружности, разделяющий упругую и пластические зоны в сечении трубы согласно А.А. Ильюшину

$$r_T = \frac{d_0}{2} \sqrt[4]{\frac{e_{r_0}^2 - e_1^2}{e_T^2 - e_1^2}}, \quad (6)$$

где  $e_{r_0}$  – деформация на радиусе  $r_0 = d_0/2$ ;  $e_1$  – осевая деформация трубы;  $e_T$  – деформация при пределе текучести. При дорновании детали с бесконечной толщиной стенки, если принять осевую деформацию  $e_1 = 0$ ,  $e_T = 0,002$ , получаем при  $a = 1$

$$r_0^2 / r_T^2 = 0,002 d_0 / (a - R_{z_0}). \quad (7)$$

Уравнение для расчета упругой усадки примет вид

$$U = (a - R_{z0}) - \frac{1 - \frac{nc}{E} \left( \frac{d_0}{a - R_{z0}} \right)^{1-n}}{1 - (d_0 / D_0)^2} \left[ (a - R_{z0}) - 0,002d_0 \left( \ln \frac{a - R_{z0}}{0,002d_0} \right) \right], \quad (8)$$

где  $E$  - модуль упругости;  $c, n$  - значения, определяемые по кривым течения при растяжении  $n = 0,1..0,16$ ;  $c = 0,6..1,6$ .

Учитывая упругую деформацию дорна и высоту волны внеконтактной деформации, выражение (3) примет вид

$$\Delta = 2y - 2h_b + (a - R_{z0}) - \frac{1 - \frac{nc}{E} \left( \frac{d_0}{a - R_{z0}} \right)^{1-n}}{1 - (d_0 / D_0)^2} \left[ (a - R_{z0}) - 0,002d_0 \left( \ln \frac{a - R_{z0}}{0,002d_0} \right) \right]. \quad (9)$$

Из выражений (1, 9) видно, что качество отверстия выше при минимальных номинальном натяге  $a$  и предварительной высоте шероховатости поверхности  $R_{z0}$ .

Размещение детали перед дорнованием в жесткий корпус  $б$ , диаметр цилиндра которого превышает наружный диаметр заготовки на величину меньшую, чем его увеличение при деформировании, позволяет получить более точное отверстие. Стремление отверстия к искажениям гасится жесткостью цельного толстостенного или разъемного корпуса  $б$ .

Штоки  $1$  устанавливаются равномерно под углами относительно друг друга, например: три штока под углом  $120^\circ$ , четыре штока под углом  $90^\circ$  и т.д. Штоки круглого сечения, выполнены из материала – сталь 50Г, 65Г.

Для установке заготовки  $5$  предусмотрена самоустанавливающаяся опора для протяжных станков (а.с. № 390878 опубл. 25.07.73. Бюл. № 31), повышающая точность обработки, например при дорновании с большими натягами, выполненная в виде корпуса  $б$  с опорным фланцем, взаимодействующего при помощи упорного подшипника  $7$  с торцом шарового сектора втулки  $8$ , которая установлена с зазором в шаровом секторе корпуса  $9$ , закрепленные гайками  $10, 11$  с пружинами  $12, 13$ .

#### **Обработку точных отверстий осуществляют следующим образом.**

Заготовку  $5$  устанавливают в корпус  $б$  самоустанавливающейся опоры для протяжного станка, так чтобы в первоначальный момент захода дорна  $4$  входное отверстие заготовки  $5$  совпало с внутренним отверстием направляющей втулки  $2$  и жестко закрепляют.

Дорн  $4$  пропускают сквозь внутреннее отверстие направляющей втулки  $2$  до соприкосновения его с заготовкой  $5$ , поворачивают державку  $3$  штоков  $1$ , создавая сжимающее усилие  $P, Н$ :

$$P \geq \frac{9\pi EJ}{l_{шт}^2} n_{шт}, \quad (10)$$

где  $E$  – модуль упругости материала штока, МПа;  $J$  – момент инерции,  $Н \cdot мм^2$ ;  $n_{шт}$  – количество штоков (от 3-х до 5-7), шт;  $l_{шт}$  – длина штока, мм.

При условии

$$d_{отв}/d_{шт} \geq 7, \quad (11)$$

где  $d_{шт}$  – диаметр штока, мм.

Сжатые штоки  $1$  уложатся спиралью по внутреннему отверстию направляющей втулки  $2$  и создадут усилие давления на дорн  $4$  и на внутреннюю поверхность направляющей втулки  $2$ . Реакция внутренней поверхности будет направлена в центр внутренней поверхности направляющей втулки  $2$ , а результирующая сила будет расположена точно на оси внутренней поверхности направляющей втулки  $2$ , обеспечивая при этом двойную направляющую опору, расположенную по оси в направляющей втулке.

По мере продвижения дорна  $4$  в заготовке  $5$  штоки  $1$  с внутренней поверхности направ-

ляющей втулки 2 будут переходить на внутреннюю поверхность заготовки 5 и при условии

$$l_{\text{отв}}/d_{\text{отв}} \geq 2 l/d_{\text{отв}} \geq 2, \quad (12)$$

где  $l_{\text{отв}}$  – длина обработанной поверхности отверстия, мм.

Двойная направляющая переместится на ось внутренней поверхности заготовки 5 и таким образом будет обеспечиваться точность центрирования (самоцентрирование) дорна 4 относительно внутренней поверхности заготовки 5, а в глубоких отверстиях в момент работы дорна 4 штоки сами дополнительно выравнивают обработанную дорном 4 внутреннюю поверхность заготовки 5.

При обработке отверстий предлагаемым устройством осуществляется перераспределение усилия на торцовую плоскость дорна, обеспечивающее ее положение строго по оси заготовки за счет саморегулирования системой нескольких толкателей в виде штоков (не менее трех) равной длины, которые при повороте их державкой принимают спиральный вид. Сначала волны спиралей, контактируя с внутренней поверхностью направляющей втулки, обеспечивают самоустановку дорна относительно оси заготовки, а при дальнейшем перемещении дорна волны спиралей контактируют с обработанной поверхностью.

Неперпендикулярность опорного торца детали 5 к его образующей могут вызвать отклонения от осесимметричного течения металла заготовки, а значит и возмущения в осевой деформации, которые на начальном этапе дорнования зависят от точности внутренней поверхности направляющей втулки, а при дальнейшем перемещении дорна от погрешностей, возникающих во внеконтактных зонах деформации.

Расположение сжимающих стержней в цилиндрическом пространстве направляющей относительно осей и описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x_n = a \cos(\varphi + \Delta\varphi_n), \\ y_n = b \sin(\varphi + \Delta\varphi_n), \\ z = R \sin\varphi \end{cases} \quad (13)$$

и если привести их в канонический вид

$$\begin{cases} x_1 = a \cos(\varphi + \Delta\varphi_1) \\ x_2 = a \cos(\varphi + \Delta\varphi_2) \\ \dots \\ x_n = a \cos(\varphi + \Delta\varphi_n) \end{cases} \begin{cases} y_1 = b \sin(\varphi + \Delta\varphi_1) \\ y_2 = b \sin(\varphi + \Delta\varphi_2) \\ \dots \\ y_n = b \sin(\varphi + \Delta\varphi_n) \end{cases} \quad z = R \sin\varphi \quad (14)$$

где  $n$  – количество штоков 1 (рис. 1),  $n = 3, 4, \dots$ ;  $\varphi$  – угол поворота  $n$ -го штока;  $\Delta\varphi$  – приращение угла  $n$ -го штока:

$$\Delta\varphi_1 = 0; \quad \Delta\varphi_2 = \frac{360}{n}; \quad \Delta\varphi_3 = \frac{360 \cdot 2}{n}; \quad \Delta\varphi_4 = \frac{360 \cdot 3}{n} \quad \text{и т.д.} \quad (15)$$

Причем  $\Delta\varphi$  определяется количеством  $n$  штоков (стержней) 1, прикрепленных к державке 3 и дорну 4 в плоскости  $xu$ , равномерно располагаясь в пределах радиуса  $R$  по формуле  $360/n$ .

Соответственно длина всех штоков  $L$  будет одинакова и рассчитываться по формулам цилиндрической спирали

$$L^2 = (2\pi R_{\text{сп}})^2 + S^2, \quad \sin \alpha = \frac{S}{L}, \quad \text{tg } \alpha = \frac{S}{2\pi R_{\text{сп}}}, \quad l = \kappa S, \quad (16)$$

где  $L$  – длина штока;  $R_{\text{сп}}$  – радиус спирали;  $S$  – шаг спирали;  $\alpha$  – угол подъема витка;  $\kappa$  – количество витков.

Одним из наиболее простых и универсальных методов определения перемещений в

стержнях является метод с использованием интеграла Мора [2], который может быть получен с помощью начала возможных перемещений, формулирующийся применительно к теории стержней следующим образом: возможная работа  $\delta A$  внешних сил равна возможной работе внутренних силовых факторов  $\delta U$ .

$$\delta U = \int_0^{l_T} \left( N_1 \delta \varepsilon_0 + Q_{1x} \delta \gamma_x + Q_{1y} \delta \gamma_y + M_{1x} \delta \left( \frac{d\varphi_x}{ds} \right) + M_{1y} \delta \left( \frac{d\varphi_y}{ds} \right) + M_{1k} \delta \left( \frac{d\theta}{ds} \right) \right) ds, \quad (17)$$

где  $N_1, Q_{1x}, Q_{1y}, M_{1x}, M_{1y}, M_{1k}$  - усилия и моменты в поперечных сечениях стержня;  $\delta \varepsilon_0, \delta \gamma_x, \delta \gamma_y$  - вариации деформации растяжения и сдвига;  $\delta \left( \frac{d\varphi_x}{ds} \right), \delta \left( \frac{d\varphi_y}{ds} \right), \delta \left( \frac{d\theta}{ds} \right)$  - вариации производных углов поворота (кривизн);  $x, y$  - главные оси сечения.

Ось стержня предполагается с начальной достаточно малой кривизной и применяются соотношения теории стержней. В качестве возможных смещений для единичной системы берутся действительные перемещения при действии на стержень системы внешних сил

$$\delta \varepsilon_0 = \varepsilon_0, \delta \gamma_x = \gamma_x, \dots, \delta \left( \frac{d\theta}{ds} \right) = \frac{d\theta}{ds}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_0, \gamma_x, \frac{d\theta}{ds}$  - деформации в стержне от действия внешних нагрузок.

Возможными смещениями могут быть признаны любые малые смещения, согласующиеся с наложенными (кинематическими) связями. Приложим в точке  $A$  в направлении  $e$  единичную силу  $P = 1$  (рис. 2). Работа сил единичной системы  $\delta A = 1 \cdot \delta$ .

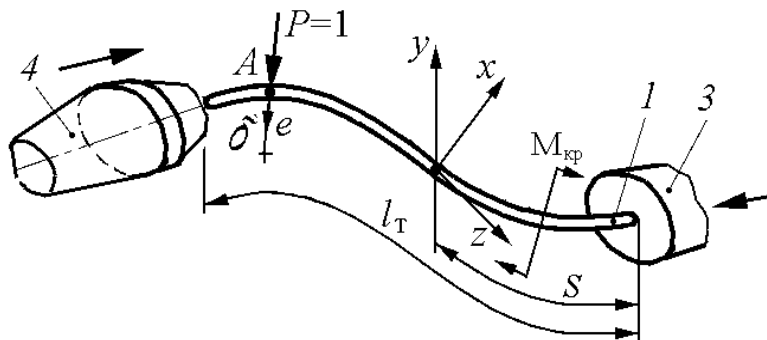


Рис. 2. Прогиб штока в точке  $A$  под действием внешней системы сил

Смещение точки в направлении приложенной единичной силы

$$\delta = \int_0^{l_T} \left( N_1 \varepsilon_0 + Q_{1x} \gamma_x + Q_{1y} \gamma_y + M_{1x} \frac{d\varphi_x}{ds} + M_{1y} \frac{d\varphi_y}{ds} + M_{1k} \frac{d\theta}{ds} \right) ds. \quad (19)$$

Выражая деформации через силовые факторы в основной системе, представим интеграл Мора, выражающий смещение точки  $A$  в направлении приложенной единичной силы от действия внешних силовых факторов и возможных дополнительных деформаций, например температурных

$$\delta = \int_0^{l_T} \left( \frac{N_1(N + N^a)}{A} + K_{1x} \frac{Q_{1x} Q_x}{A_y} + K_{1y} \frac{Q_{1y} Q_y}{A_y} + M_{1x} \frac{(M_x + M_x^a)}{B_x} + M_{1y} \frac{(M_y + M_y^a)}{B_y} + M_{1k} \frac{M_k}{C} \right) ds, \quad (20)$$

где  $C$  - жесткость сечения стержня на кручения;  $N, Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_k$  - внешние силовые факторы;  $N^a, M_x^a, M_y^a$  - дополнительные деформации, например, ультразвуковые, гидропластические и т.д.

Усилие, возникающее в зоне контакта деформирующего элемента с обрабатываемой

поверхностью, взаимоуравновешивается с усилием, передающим штоками (три и более) от державки. Усилие может взаимноизменяться в зависимости от напряженного состояния поверхности отверстия в процессе обработки (на границе между контактной и внеконтактной зонами деформаций) и в момент потери устойчивости штоков с одновременным обеспечением точности обрабатываемого отверстия за счет схождения спиральных витков строго по оси устройства.

В результате данной обработки формируется упрочненный поверхностный слой дорнованием на внутренней цилиндрической поверхности с соосностью отверстия не более 0,05 мм овальностью 0,02 мм; общей цилиндричностью (бочкообразность, седлообразность, конусность) не более 0,03 мм и суммарным искажением формы не более 0,06 мм.

#### Библиографический список

1. Пат.159407РФ, МПК В24В39/02. Устройство для дорнования точных отверстий / В.В. Крайнов, Н.М. Тудакова. – № 2015111674/02; заявл. 01.04.2015; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4. – 1 с.
2. Биргер, И.А. Стержни, пластинки, оболочки / И.А. Биргер. – М.: Физматлит, 1992. – 392 с.
3. Розенберг, А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
4. Тудакова, Н.М. Дорн для поверхностной пластической деформации внутренних поверхностей / Н.М. Тудакова, В.В. Крайнов // Труды НГТУ. – 2016. – № 3(114). – С. 150.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2017*

V.V. Kraynov, N.M. Tudakova

#### DORN ON FLEXIBLE STOCKS FOR SURFACE-PLASTIC DEFORMATION OF ACCURACY HOLES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

**Purpose:** The appearance of distortions in shape and size in the longitudinal section are the mismatching of the workpiece axes of the workpiece, tool and machine tool, the imperfection of the support that centers the position of the workpiece.

**Design/methodology/approach:** The double guide will move to the axis of the inner surface of the workpiece 5 and thus the centering accuracy of the mandrel 4 will be ensured with respect to the inner surface of the preform 5, and in the deep holes at the time of operation of the mandrel 4, the rods themselves further equalize the inner surface of the preform 5 treated with the mandrel. **Findings:** When processing the holes with the proposed device, the force is redistributed on the end plane of the mandrel, ensuring its position strictly along the axis of the workpiece due to the self-regulation by the system of several pushers in the form of rods (not less than three) of equal length

**Originality/value:** The resultant force will be located exactly on the axis of the inner surface of the guide bushing 2, while providing a double guide support axially disposed in the guide bushing.

*Key words:* Quality, hole, mandrel, hardening, surface.