

УДК 621.735.32.004

Субич В. Н.  
Шестаков Н. А.  
Степанов Б. А.  
Поличенков Е. В.

## ШТАМПОВКА С КРУЧЕНИЕМ В ОТКРЫТЫХ ШТАМПАХ

При штамповке осесимметричных поковок типа шестерен, дисков, ступиц, колес, тонкостенных оболочек различной формы встречается ряд технологических трудностей, связанных с особенностями пластического течения в тонких слоях. Прежде всего, это высокие давления, необходимые для осуществления деформации. Такие нагрузки велики даже для современных штамповых материалов, причем действуют они в том случае, когда пластическое течение в радиальном направлении не имеет кинематических ограничений. Если таковые ограничения есть (например, стадия заполнения углов штампа), то нагрузки будут в несколько раз больше. Для создания таких сил требуется уникальное оборудование большой мощности, однако и при условии его применения желаемого результата во многих случаях достичь не удастся вследствие значительных деформаций инструмента, снижающих стойкость штампов и точность поковок.

Преодоление перечисленных выше трудностей возможно при применении таких технологий, которые обеспечивают снижение технологических сил, более равномерную деформацию, возможность компенсации теплопередачи в массивные тела инструмента, получение заданной величины деформации при заданном изменении формы деформируемого тела. Одна из таких технологий, ранее рассмотренных в работах [1–3] основана на замене однокомпонентного нагружения комбинированным, когда внешние силовые воздействия на деформируемое тело осуществляются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В основе метода лежит сообщение инструменту внутренних движений, позволяющих осуществить заданное изменение кинематических условий на границе и траекторий деформации. Применительно к осесимметричной и плоской деформации такие движения обеспечиваются вращением инструмента вокруг оси симметрии или движением его в плоскости, нормальной к направлению действия деформирующей силы; в деформируемом теле возникают добавочные компоненты напряжений и деформаций, т. е. достигается качественное изменение движения среды.

Целью работы является исследование особенностей течения пластического материала в открытых штампах применительно к кривошипным и некоторым видам гидравлических и винтовых прессов с вращающимся инструментом, для которых характерно быстрое увеличение отношения угловой и линейной скоростей вблизи крайнего нижнего положения ползуна.

Процесс пластического течения в открытых штампах разделяется на несколько этапов. На первом этапе происходит одновременно формирование диска и ступицы; на втором этапе заполняются угловые элементы поковки при одновременном выдавливании материала в облой.

Если исходить из указанного выше изменения линейной и угловой скоростей в течение рабочего хода инструмента, то на первом этапе по кинематическим характеристикам течение мало отличается от традиционной деформации; положение свободных границ и давление на контактных поверхностях для этого случая известны.

Рассмотрим второй этап деформации, разделив при этом область течения на характерные зоны (рис. 1).

Зона 1 – примыкает к угловым элементам поковки; их форма и размеры будут уточнены ниже.

Зона 2 – круговая область переменной толщины с двухсвязным контуром, причем внутренний контур образован отверстием в штампе.

Зона 3 – пластически деформируемое кольцо переменного объема.

Зоны 4 и 5 – поковки являются жесткими и скользят одна относительно другой по границе, контур которой ограничен радиусом  $R_2$ .

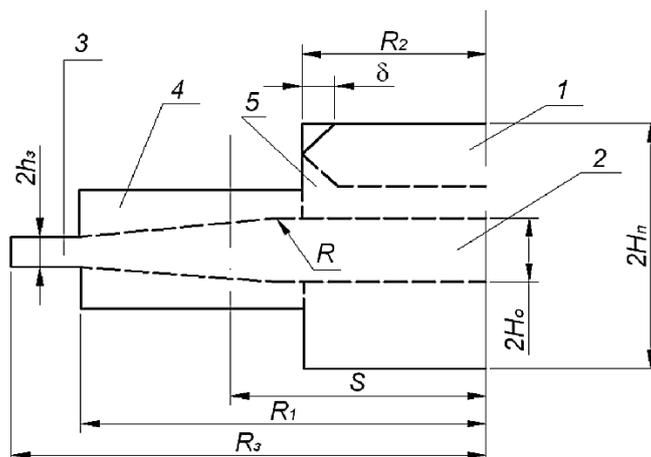


Рис. 1. Области деформации в открытом штампе

Рассмотрим вначале зону 2, процесс течения в которой при условии существования жестких областей 4 и 5 развивается независимо от остальных пластических зон. Влияние последних может распространяться лишь на величину радиуса поверхности разветвления течения  $R_1$ .

Если считать, что контактные касательные напряжения всюду достигают максимального значения, то очевидно, что верхняя и нижняя границы зоны 2 будут поверхностями скольжения, и течение в угловые элементы будет развиваться по традиционной схеме.

На основании экспериментальных данных область течения 1 может быть разделена на две зоны (рис. 2). Первая зона расположена вблизи углового элемента и характеризуется симметричным течением относительно линии, наклонной под углом  $\pi/4$  к стенке штампа.

Вторая зона прилегает к верхней границе инструмента. Напряженное состояние в ней соответствует напряженному состоянию цилиндра высотой  $2\delta$  и диаметром  $d$ , сжимаемого шероховатыми плитами.

При заполнении углов штампа среднее давление  $\tilde{p}_y$  на контактной поверхности, прилегающей к угловым элементам известно, и его величина может быть использована в качестве граничного условия при анализе течения в срединном слое переменной высоты:

$$\tilde{p}_y = p / \sigma_s = \frac{4(1 - 2\xi)^2 \cdot \xi}{\sqrt{3}(1 - \sqrt{1 - 2\xi})} + \frac{1}{6\sqrt{3}\xi} + \frac{3\pi}{4}, \quad (1)$$

где  $\xi = \delta / D$ .

Рассмотрим теперь деформацию кольцевой области переменной высоты, внешний контур которой образован радиусом поковки  $R_1$ , а внутренний отверстием в верхнем инструменте радиусом  $R$ .

Известно, что при течении в кольцевой зазор между штампами при условии, что высота его значительно меньше высоты полости штампа, пластическая область локализуется в срединной части.

На основе известных экспериментальных данных предложена зависимость относительной высоты  $H_0 / h_3$  от относительного диаметра  $D / h_3$ :

$$H_0 / h_3 = 0,035(D / h_3)^{1,5} + 1, \quad (2)$$

из которой следует, что относительная высота пластической области непрерывно растет.

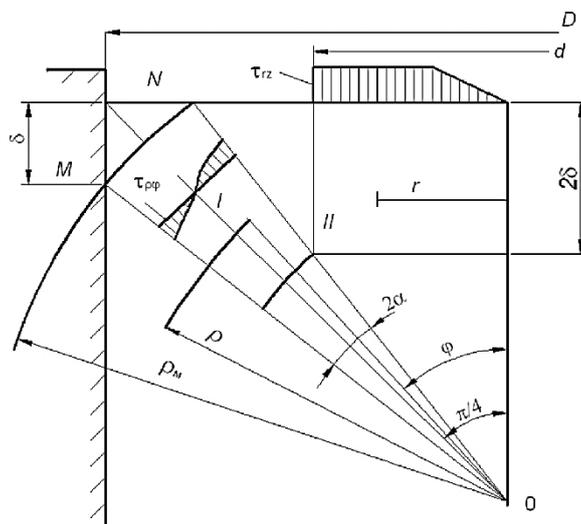


Рис. 2. Расчетная схема

На основании приведенных результатов исследований примем, что область пластической деформации в зоне 2 ограничена дугами окружностей радиусом  $R$  и двумя контурами  $R_1$  и  $R_2$ , на которых действуют «боковые давления» соответственно  $\rho_1$  и  $\rho_2$ .

Будем измерять высоту в направлении нормали к верхней границе. Тогда для рассматриваемой области имеем:

$$h = \frac{R(\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{R^2}}) + h_3}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}}. \tag{3}$$

При  $r = 0$ ,  $h = H_0$  и из (2) найдем соотношение:

$$R(1 - \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{R^2}}) = 0,035h_3(\frac{R_1}{h_3})^{1,5},$$

из которого, принимая  $\sqrt{1 - \frac{R_1^2}{R^2}} \approx \frac{R_1^2}{2R^2}$ , определяется текущий радиус сферы:

$$R = \frac{1}{0,07} \sqrt{R_1 h_3}. \tag{4}$$

Подставляя (4) в (3) получим:

$$h = \frac{R(\sqrt{1 - \rho^2 \kappa} - \sqrt{1 - \kappa_1}) + h_3}{\sqrt{1 - \rho^2 \kappa_1}}, \tag{5}$$

где обозначено  $\rho = r/R_1$ ,  $\kappa_1 = R/200h_3$ .

Запишем уравнение равновесия для рассматриваемой задачи, учитывая, что кривизны  $k_1 = -1/R$ ,  $k_2 = 1/R$  [4]:

$$\frac{d\sigma_v}{d\rho} = -R_1 \frac{\tau_{\xi v}}{\sqrt{3}h} \cdot \sin(\arccos \kappa_1 \rho). \tag{6}$$

Несмотря на то, что граница пластической области подвижна, ее смещение не влечет за собой вытеснения материала в зазор между штампами. В упомянутую область материал поступает через границу со скоростью движения инструмента  $v_0$ , поэтому производная  $\partial h / \partial t$  не имеет здесь значения скорости на границе, а отражает лишь изменение толщины слоя. В силу того (считая скорость  $u$  постоянной по высоте) уравнения для скорости  $u$  и скольжения по форме будут совпадать с соответствующими уравнениями для круговой области с двухсвязным контуром [5]. Определяя  $h$  из (5) и полагая  $\kappa_1 = R_1 / 2\sqrt{3}h$ , получим:

$$u = \frac{R_1}{4} v_0 \frac{\rho^2 - c^2}{\rho [R(\sqrt{1 - \rho^2 \kappa_1} - \sqrt{1 - \kappa_1}) + h_3]}, \quad (7)$$

где  $c = S / R_1$ .

Относительная угловая скорость вращения точек границы находится из соотношений, приведенных в [6]:

$$a = \frac{\rho}{\rho + \frac{R_1}{2\sqrt{3}} \frac{\sqrt{1 - \kappa_1 \rho^2} (\rho^2 - c^2)}{R(\sqrt{1 - \rho^2 \kappa_1} - \sqrt{1 - \kappa_1}) + h_3}}. \quad (8)$$

Используя (8), получим выражение для касательных напряжений на границе:

$$\tilde{\tau}_{\xi v} = \frac{1}{\left[1 + \frac{q^2 \rho^4}{\left(\rho + \frac{R_1}{2\sqrt{3}} \frac{\sqrt{1 - \kappa_1 \rho^2} (\rho^2 - c^2)}{R(\sqrt{1 - \rho^2 \kappa_1} - \sqrt{1 - \kappa_1}) + h_3}\right)^2}\right]^{1/2}}. \quad (9)$$

Граничное условие на контуре  $r = R_2$  будет:

$$\tilde{\sigma}_v \Big|_{r=R_2} = \tilde{p}_y.$$

Граничное условие на контуре  $r = R_1$  вытекает из решения задачи осадки с кручением плоского диска, аналогичной рассмотренной ранее. Только здесь следует иметь в виду, что вследствие вытеснения материала из штампа скорость  $u_3$  из области 2 будет определяться соотношением:

$$u_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \kappa v_0 \left[ \frac{\rho'^2 - \rho_1'^2}{\rho'} + \rho' (1 - c^2) \right], \quad (10)$$

где  $\rho' = r / R_3$  ( $\rho_1' \leq \rho' \leq 1$ ),  $\kappa = R_3 / 2\sqrt{3}h$ ,  $\rho_1' = R_1 / R_3$ .

Используя основные кинематические уравнения [2] с учетом (10), найдем:

$$a = \frac{\rho'}{\rho' + \kappa [\rho'^2 - \rho_1'^2 + \rho' \rho_1' (1 - c^2)]}. \quad (11)$$

Отсюда находим:

$$\tilde{\tau}_{rz} = \frac{\rho' + \kappa [\rho'^2 - \rho_1'^2 + \rho' \rho_1' (1 - c^2)]}{\left\{ \left[ \rho' + \kappa [\rho'^2 - \rho_1'^2 + \rho' \rho_1' (1 - c^2)] \right]^2 + q^2 \rho'^4 \right\}^{1/2}}, \quad (12)$$

где  $q = \frac{\omega R_3}{\sqrt{3}v_0}$  – параметр кручения;

$\omega$  и  $v_0$  – соответственно угловая и линейная скорости инструмента.

Подставляя (12) в уравнение равновесия и интегрируя в пределах  $(1, \rho'_1)$ , найдем  $\tilde{\sigma}_z|_{\rho'=\rho'_1}$ . Постоянная интегрирования определяется из соотношения

$$a_1 = \frac{1}{\{1 + \kappa[1 - \rho_1'^2 + \rho_1'(1 - c^2)]\}} \quad [4]. \text{ Для решения задачи необходимо повторить процедуру,}$$

изложенную при рассмотрении течения в круговой области с двухсвязным контуром, т. е. использовать метод последовательных приближений. Задавая некоторое значение координаты разветвления течения  $c^{(0)}$ , из (7) находим скорость  $u^{(0)}$ , а из (9), (12) и (6) нормальное напряжение на границе. Определив ребро эпюры напряжений, найдем новое значение  $c^{(1)}$ ; далее расчет повторяется до полученной точности. По конечному значению  $c$  находим скорости в направлении ступицы и внешнего контура, а также распределение напряжений в данный момент времени. Координата  $c$  изменяется при развитии процесса, поэтому зададим малый промежуток времени  $\Delta t$  и будем считать в течение этого промежутка величину  $c$  неизменной. Средняя скорость  $v_\Gamma$  движения границы  $z = \pm H_n/2$  будет:

$$v_\Gamma = v_0 \left[ \frac{1}{4} \frac{c}{\rho_1} (c^2 - \rho_6^2) + 1 \right]; \quad \rho_2 = \frac{R_2}{R_1}. \quad (13)$$

Текущий размер фаски и скорость  $v_\Gamma$  связаны соотношением:

$$\int_0^t v_0 dt = 4R_2 \left[ \left( \frac{\xi_0^2}{3} - \xi^2 \right) - \frac{2}{3} \left( \xi_0^3 - \xi^3 \right) \right], \quad [\xi = \delta/R]. \quad (14)$$

Текущая высота зазора между штампами:

$$h_3 = h_{30} - \int_0^t v_0 dt. \quad (15)$$

Скорость точек контура  $r = R_3$ .

$$u_3|_{r=R_3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \kappa v_0 (1 - \rho_1'^2 + \rho_1' - c^2), \quad (16)$$

и, следовательно, радиус наружного контура:

$$R_3 = R_3|_{t=0} + \int_0^t u_3|_{r=R_3} dt. \quad (17)$$

Если заданы размеры скорости  $v_0 = v_0(t)$ ,  $\omega = \omega(t)$  и границы области течения при  $t = 0$  (в данном случае время не является существенной переменной и может быть заменено, например, текущей высотой зазора между штампами), то совместное решение уравнений (7)–(17) дает описание развития процесса открытой штамповки. Если  $c = \rho_6$ , то, как следует из (10), течение развивается в областях 2 и 3 (рис. 1), т. е. имеет место стадия доштамповки.

В этом случае разветвление течения имеет место на оси симметрии, и задача (3–17) решается непосредственно численным интегрированием. На рис. 3. показано распределение напряжений в стадии доштамповки для различных условий деформации.

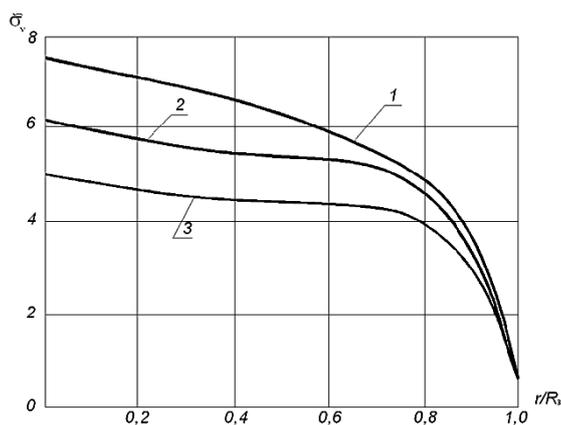


Рис. 3. Распределение нормального напряжения  $\tilde{\sigma}_\theta$  на границе области течения в стадии доштамповки:

1 –  $q = 0$ ; 2 –  $q = 5$ ; 3 –  $q = 10$ ;  $R_3 = 110$  мм;  $R_1 = 100$  мм;  $h_3 = 2$  мм

### ВЫВОДЫ

Показано, что основным параметром, определяющим сопротивление деформации при заполнении углов, является отношение размера фаски к диаметру ступицы; отношение высоты ступицы к ее диаметру не оказывает существенного влияния на величину контактного давления.

Установлено, что штамповка с кручением в открытых штампах эффективна на кривошипных и гидравлических прессах с вращающимся ползуном, технические характеристики которых обеспечивают быстрое увеличение отношения угловой и линейной скоростей вблизи крайнего нижнего положения ползуна. В этом случае достигается существенное снижение технологической силы и давления на инструмент без чрезмерного роста работы деформации.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субич В. Н. Исследование теплообмена при штамповке с кручением / В. Н. Субич // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2003. – № 3. – С. 48–52.
2. Власов А. В. Расчет процессов штамповки с кручением МКЭ / А. В. Власов, Н. А. Шестаков, В. Н. Субич // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2005. – № 1. – С. 22–28.
3. Субич В. Н. Научно-технические технологии объемной штамповки / В. Н. Субич, Н. А. Шестаков, В. А. Демин // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2011. – № 3. – С. 24–30.
4. Штамповка с кручением / В. Н. Субич, Н. А. Шестаков, В. А. Демин, А. В. Власов. – М. : МГИУ, 2008. – 389 с.
5. Субич В. Н. Объемная штамповка с кручением тонкостенных конических деталей / В. Н. Субич, Н. И. Куминова // *Известия МГИУ. Естественные и технические науки*. – 2009. – № 3 (12). – С. 18–20.
6. Субич В. Н. Пластическое течение в тонком двухсвязном коническом слое переменной толщины при деформации вращающимся инструментом / В. Н. Субич, Н. И. Куминова // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1 (18). – С. 60–65.*

Субич В. Н. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. МГИУ;  
 Шестаков Н. А. – д-р техн. наук, проф., декан МГИУ;  
 Степанов Б. А. – канд. техн. наук, проф. МГИУ;  
 Поличенков Е. В. – ст. лаборант МГИУ.

МГИУ – Московский государственный индустриальный университет, г. Москва, Россия.

E-mail: shes-v@mail.msiu.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2013 г.