

выдавливается в зону, примыкающую к свободной от нагрузок боковой поверхности заготовки. На второй стадии пластическая деформация достигает оси заготовки. Зона, примыкающая к свободной боковой поверхности заготовки, пластически не деформируется и перемещается перпендикулярно к плоскости, в которой лежат оси заготовки и бойков. Сечение очага деформации в плоскости, перпендикулярной к оси заготовки, показано на рис. 1. Очаг деформации имеет две плоскости симметрии: первая включает ось заготовки и оси бойков, а вторая перпендикулярна к первой. Соответственно, сечение заготовки, перпендикулярное к ее оси, имеет две оси симметрии: OE и OB (см. рис. 1).

При анализе напряженно-деформированного состояния в пластической зоне принимаем прямоугольную систему координат, начало которой совпадает с центром сечения O , а оси x и y – с осями симметрии сечения заготовки OE и OB соответственно. Определенному значению дуги контакта верхнего бойка с металлом заготовки соответствует определенное значение вертикального перемещения h_1 верхнего бойка относительно центра O и горизонтальное смещение l_1 центра C свободной цилиндрической поверхности относительно O . Величины h_1 и l_1 можно определить из условия постоянства площади сечения заготовки, если считать, что свободная от нагрузок поверхность AE является цилиндрической, а радиус ее равен r , т. е. первоначальному значению.

Половине дуги контакта верхнего бойка с металлом заготовки AB соответствует центральный угол γ , а половине дуги свободной поверхности AE – угол α .

В этом случае площадь рассматриваемой части сечения деформированной заготовки:

$$F_{ABOE} = F_{ABOЦ} + F_{AЦE} = \pi r^2 / 4, \quad (1)$$

где $F_{AЦE} = \frac{1}{2} r^2 \alpha$; $F_{ABOЦ} = F_{AÇOЦ} - F_{ACB}$.

Из геометрических соотношений:

$$F_{ACB} = \frac{1}{2} R^2 \gamma - \frac{1}{2} R^2 \sin \gamma \cos \gamma = \frac{1}{2} R^2 \left(\gamma - \frac{\sin 2\gamma}{2} \right);$$

$$F_{AÇOЦ} = \frac{1}{2} (l_1 + R \sin \gamma) r \sin \alpha.$$

Подставив выражения для определения площадей составляющих частей сечения заготовки в (1), получим:

$$(l_1 + R \sin \gamma) r \sin \alpha - R^2 \left(\gamma - \frac{\sin 2\gamma}{2} \right) + r^2 \alpha = \frac{\pi r^2}{2},$$

Или:

$$\left(m + \frac{R}{r} \sin \gamma \right) \sin \gamma - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left(\gamma - \frac{\sin 2\gamma}{2} \right) + \alpha - \frac{\pi}{2} = 0, \quad (2)$$

где $m = l_1 / r$.

Уравнение (2) содержит неизвестные m и α . Второе уравнение, которое содержит те же неизвестные, получим, используя равенство $CD = AC - AD$ (см. рис. 1). Учитывая, что:

$$CD = l_1; \quad AC = R \sin \gamma, \quad AD = r \cos \alpha,$$

получим:

$$l_1 = R \sin \gamma - r \cos \alpha,$$

или

$$m = \frac{R}{r} \sin \gamma - \cos \alpha. \quad (3)$$

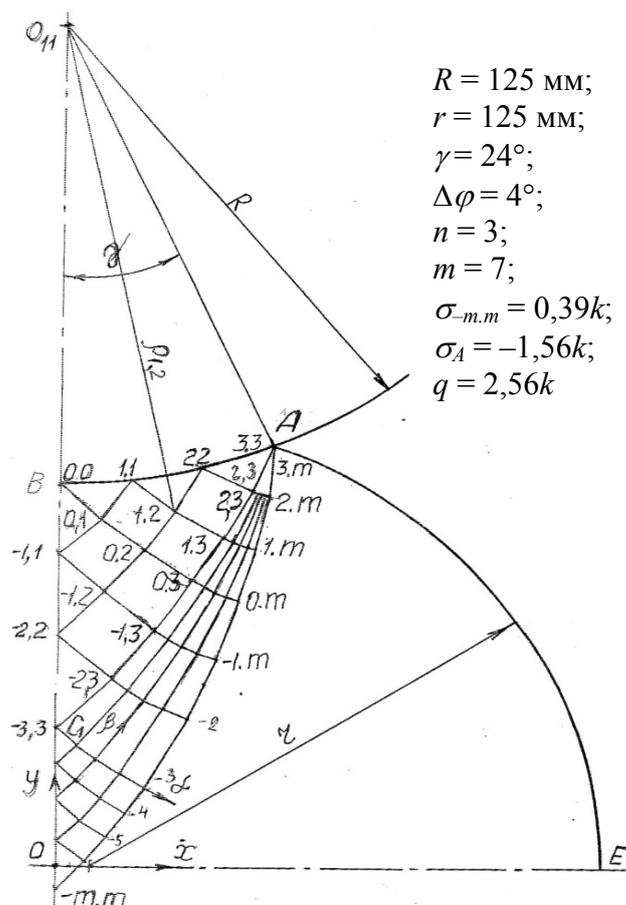


Рис. 2. Поле линий скольжения при обжатии круглой заготовки двумя профилированными (цилиндрическими) бойками

Система уравнений (2) и (3) позволяет определить m и α , а затем все геометрические размеры, которые используются при решении конкретной задачи, если задано значение угла γ . Подставив m из уравнения (3) в (2) и получим уравнение с одним неизвестным α :

$$2 \frac{R}{r} \sin \gamma \sin \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left(\gamma - \frac{\sin 2\gamma}{2} \right) + \alpha - \frac{\pi}{2} = 0, \quad (4)$$

которое решается методом последовательных приближений.

Перемещение верхнего бойка относительно заготовки:

$$h_1 = OO_{10} - OO_{11},$$

где OO_{10} – расстояние между центром сечения заготовки и центром сечения верхнего бойка в момент касания цилиндрических поверхностей заготовки и верхнего бойка;

OO_{11} – то же в рассматриваемый момент.

Соответственно:

$$OO_{10} = R + r;$$

$$OO_{11} = R \cos \gamma + r \sin \alpha. \quad (5)$$

Следовательно:

$$h_1 = R(1 - \cos\gamma) + r(1 - \sin\alpha); \quad (6)$$

$$l_1 = R\sin\gamma - r\cos\alpha. \quad (7)$$

Для определения усилия деформирования и размеров зоны пластической деформации необходимо построить сетку линий скольжения (графически или численно) (рис. 2). При построении сетки используем заданные величины R , r , γ и рассчитанные значения OO_{11} , α , l_1 . Дополнительно необходимо задать граничные условия – коэффициент трения (по Зибелю):

$$\mu = \tau_k / 2k,$$

где τ_k – контактное касательное напряжение;

$k = \sigma_T / \sqrt{3}$ – пластическая постоянная неупрочняющегося металла;

σ_T – предел текучести металла.

При построении сетки линий скольжения дополнительно гипотетически принимаем, что контактное нормальное напряжение не изменяется вдоль линии контакта AB (см. рис. 2), а $\mu = 0$. В этом случае угол между направлением линии скольжения и касательной к контуру AB :

$$\delta = \frac{1}{2} \arccos 2\mu = 45^\circ,$$

а линии скольжения в области ABC_1 являются логарифмическими спиралями с центром в точке O_{11} , которые пересекают свои радиусы под углом 45° . Уравнение для определения радиуса точки на линии, которая начинается на контактной поверхности: $(0, 0)$, $(1, 1)$ и т. д.:

$$\rho = Re^{\pm\varphi}, \quad (8)$$

где φ – угол поворота линии от рассматриваемой точки на контактной поверхности (в радианах); угол φ положительный, если радиус и касательная к линии поворачиваются против часовой стрелки, отрицательный – по часовой стрелке.

Для линий семейства α в уравнении (8) угол φ подставляют со своим знаком, семейства β – с противоположным.

Для построения равноугольной сетки величину угла поворота рассматриваемой линии скольжения при переходе от одного узла к следующему удобно задать уравнением:

$$\Delta\varphi = \gamma / 2n, \quad (9)$$

где n – число участков, на которые разбиваем дугу AB .

Узловую точку сетки обозначаем (i, j) , где i – номер линии семейства α , j – семейства β . За нулевые линии принимаем линии, проходящие через точку B , которая лежит на линии центров заготовки и бойка. Таким образом, $(0, 0)$ – точка B , (n, n) – точка A (см. рис. 2). Линии семейства α , расположенные выше нулевой, имеют положительные номера, а ниже – отрицательные. Линии семейства β имеют положительные номера, если они начинаются на контактной поверхности справа от линии OO_{11} (точка B). Тогда:

$$\rho_{i,j} = Re^{(j-i)\Delta\varphi}.$$

Координаты точки (i, j) :

$$x_{i,j} = \rho_{i,j} \sin \gamma_{i,j} = \rho_{i,j} \sin [(i+j)(\Delta\varphi)]; \quad (10)$$

$$y_{i,j} = OO_{11} - \rho_{i,j} \cos [(i+j)(\Delta\varphi)]. \quad (11)$$

Угол между направлением оси x и положительным направлением линии семейства α в точке (i, j) :

$$\theta_{i,j} = -\pi/4 + (i+j)(\Delta\varphi). \quad (12)$$

Таким образом, для всех узловых точек сетки в области ABC_1 будут известны координаты и угол θ , в том числе и для линии AC_1 : $(n, n), (n-1, n), \dots, (-n, n)$ семейства β .

В области AOC_1 координаты узловых точек сетки определяем численным интегрированием. Все линии семейства β этой области начинаются в крайней точке линии контакта A . Она является особой точкой – точкой разрыва напряжений.

В области AOC_1 последовательно строим $(n+1)$ -ую, $(n+2)$ -ую и т.д. линии семейства β , проходящие через точку A .

Построение очередной j -той линии β начинаем с определения параметров точки (n, j) , которая совпадает с точкой A . Для этой точки:

$$x_{n,j} = x_{n,n}; \quad y_{n,j} = y_{n,n}; \quad \theta_{n,j} = -\frac{\pi}{4} + (i+j)(\Delta\varphi).$$

Для других узловых точек фиксированной линии β номер j остается неизменным, а i последовательно уменьшается на единицу, т.е. $i = n-1, n-2, \dots, i = -j$. В рассматриваемой точке (i, j) :

$$\theta_{i,j} = -\frac{\pi}{4} + (i+j)(\Delta\varphi).$$

Координаты точки (i, j) , пока $(i+j) > 0$, определяем, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{y_{i,j} - y_{i,j-1}}{x_{i,j} - x_{i,j-1}} = \operatorname{tg} \frac{\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{2} \\ \frac{y_{i,j} - y_{i+1,j}}{x_{i,j} - x_{i+1,j}} = -\operatorname{ctg} \frac{\theta_{i,j} + \theta_{i+1,j}}{2} \end{cases}$$

Когда $i = -j$, то:

$$\theta_{i,j} = -\pi/4; \quad x_{i,j} = 0; \quad y_{i,j} = y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \operatorname{ctg}(\pi/4 - \Delta\varphi/2).$$

Последняя m -ая линия семейства β проходит через точку O . Последняя точка этой линии имеет $i = -m, j = m$. Среднее напряжение в точке O ($-m, +m$) определим из условия равновесия жесткой зоны, расположенной справа от линии OA . Горизонтальная составляющая равнодействующей сил, действующих на эту зону равна нулю. Эту горизонтальную составляющую имеют силы, действующие на эту жесткую зону со стороны пластической.

Касательные напряжения вдоль линии OA имеют постоянную величину k . Горизонтальная составляющая сил, вызванной этими напряжениями:

$$P_{x\tau} = -x_{n,n} \cdot k.$$

Горизонтальная составляющая сил, вызванной нормальными напряжениями:

$$P_{x\sigma} = -\int_0^A \sigma dy,$$

где $\sigma = \sigma_0 - 2k(\theta - \theta_0)$;

σ_0 – среднее нормальное напряжение в точке O .

Так как угол θ известен только в узловых точках линии OA , то последнюю составляющую можно определить численным интегрированием:

$$P_{x\sigma} = - \sum_{i=-m}^{n-1} \frac{\sigma_{i,m} + \sigma_{i+1,m}}{2} (y_{i+1,m} - y_{i,m}),$$

где $\sigma_{i,m} = \sigma_0 - 2k(i+m)(\Delta\varphi)$;

$$\sigma_{i+1,m} = \sigma_0 - 2k(i+1+m)(\Delta\varphi).$$

Тогда:

$$P_{x\sigma} = \sigma_0 y_{n,n} - k(\Delta\varphi) \sum_{i=-m}^{n-1} (2i+2m+1)(y_{i+1,m} - y_{i,m}).$$

Так как $P_{x\tau} + P_{x\sigma} = 0$, то имеем:

$$\sigma_0 = \frac{k \left[(\Delta\varphi) \sum_{i=-m}^{n-1} (2i+2m+1)(y_{i+1,m} - y_{i,m}) - x_{n,n} \right]}{y_{n,n}}.$$

Среднее напряжение на контактной поверхности AB :

$$\sigma_A = \sigma_0 - 4km(\Delta\varphi),$$

а нормальное напряжение на контактной поверхности:

$$\sigma_k = \sigma_0 - 4km(\Delta\varphi) - k.$$

Контактное давление на поверхности AB :

$$q = |\sigma_k|.$$

Сила деформирования на единичной длине заготовки:

$$P_{e\partial} = 2qx_{n,n}.$$

Тогда сила деформирования заготовки бойком без учета влияния передней и задней жестких зон:

$$P = 2lqx_{n,n},$$

где l – длина контактной поверхности.

Правильность решения поставленной задачи проверена путем выявления физических полей линий скольжения, которые подтверждают графические картины линий скольжения, полученные на заготовках $\varnothing 30$ мм из стали 10.

На рис. 3, а–в показаны физические поля линий скольжения при единичном обжатии круглой заготовки двумя профилированными бойками со степенью деформации 7, 14 и 21 % соответственно, а на рис. 3, г показаны физические поля линий скольжения в заготовке после кантовки её на 90° и обжатия до получения 4-лучевой формы.

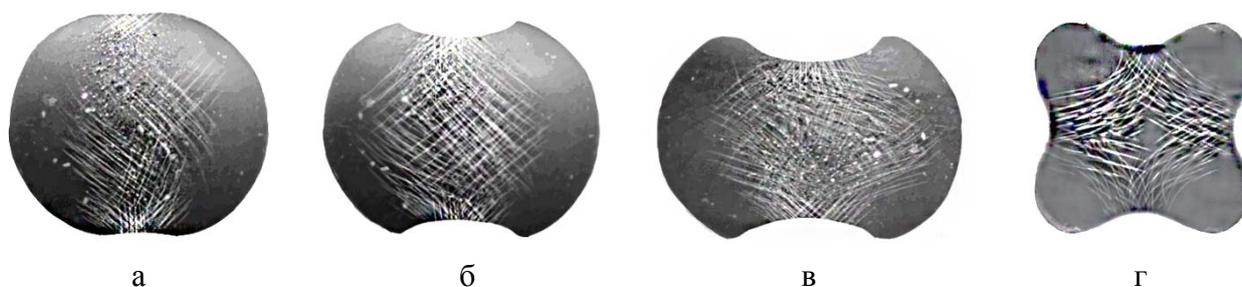


Рис. 3. Картины физических полей линий скольжения при обжатии круглой заготовки двумя профилированными бойками:

а – $\varepsilon = 7\%$; б – $\varepsilon = 14\%$; в – $\varepsilon = 21\%$; г – после кантовки заготовки на 90° и обжатия её до получения 4-лучевой формы

ВЫВОДЫ

На основе метода графических полей линий скольжения и численного интегрирования разработана математическая модель для оценки напряженно-деформированного состояния и силовых режимов при обжатии заготовки профилированными цилиндрическими бойками.

Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при протяжке круглой заготовки двумя профилированными бойками.

Решение поставленной задачи подтверждено построением физических картин линий скольжения, которые получены для обжатия круглой заготовки профилированным инструментом и условий ковки 4-лучевой заготовки при двух обжатиях с промежуточной кантовкой на 90° .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин В. А. *Инновационные технологии ковки* / В. А. Тюрин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2006. – № 5. – С. 27–29.
2. Тюрин В. А. *Инновационные технологии ковки с применением макросдвигов* / В. А. Тюрин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
3. *Ковка слитков на прессах* / Л. Н. Соколов, Н. М. Золотухин, В. Н. Ефимов [и др.]; под общ. ред. Л. Н. Соколова. – К.: Техника, 1984. – 127 с.
4. Охрименко Я. М. *Технология кузнечно-штамповочного производства* / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
5. *Исследование влияния конфигурации модельных слитков на их качество и поковок из них* / Б. Е. Михайленко, И. Г. Сорокин, Г. С. Гребенюк, В. П. Королев [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1979. – № 8. – С. 10–12.
6. Пат. № 62818 Украина В 21 j 5/00. *Пристрій для протяжки злитків* / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Кухар В. В., Марков О. С., Ковалькова Я. О., Левандовський В. Ф.; заявл. 09.03.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. – 4 с.; ил.

Каргин С. Б. – аспирант ПГТУ;

Кухарь В. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ;

Левандовский В. Ф. – канд. техн. наук, доц. каф. МТО ДГМА.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2011 г.