

**Теоретическое исследование процесса высадки деталей с прямоугольной в плане головкой.**

Филиппов Ю.К., Калпин Ю.Г., Глазунов Д.А.  
 Университет машиностроения

*Аннотация.* Исследованию подвергается процесс высадки детали с прямоугольной в плане головкой. Приводится методика расчета методом баланса мощностей для высадки прямоугольной головки болта.

*Ключевые слова.* Расчет методом баланса мощности, методика расчета силы для высадки стержневых деталей, расчет силы высадки болта

**Введение**

Процесс не осесимметричной деформации материала сжимающими силами достаточно распространен в области обработки металлов давлением [4-10]. Наиболее эффективным методом решения задач высадки деталей с прямоугольной в плане головкой является метод баланса мощностей, согласно которому мощность, развиваемая деформирующим инструментом, равна сумме мощности пластической деформации в очаге и по его границам и мощности, развиваемой силами контактного трения. Основу метода составляет выбор кинематически допустимого поля скоростей.

Поскольку прямоугольная в плане головка имеет две оси симметрии, достаточно рассмотреть поле скоростей в одной ее четверти (рисунок 1). Примем, что компонента скорости материальных точек вдоль оси Z не зависит от координат ρ и Θ и изменяются по линейному закону в зависимости от координаты Z. Подобное допущение общепринято при рассмотрении процессов осесимметричной осадки и высадки.

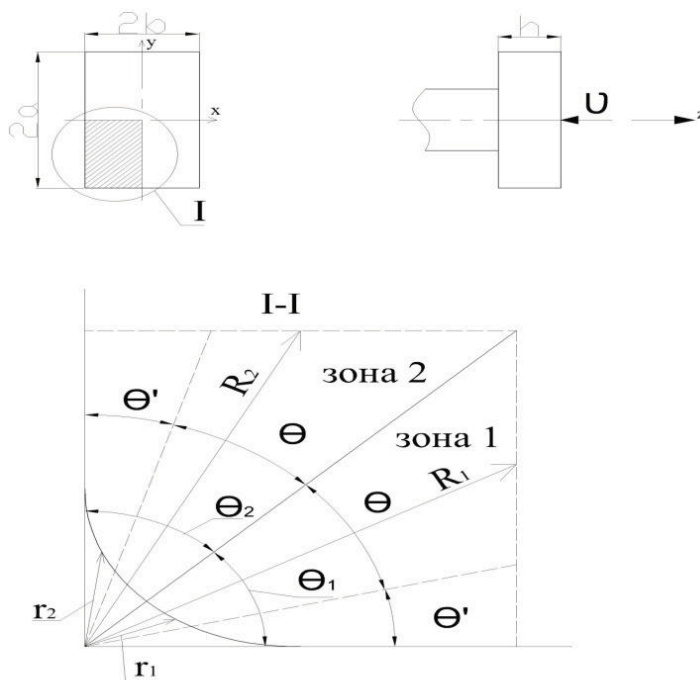
Таким образом,

$$U_z = KZ,$$

где K- коэффициент пропорциональности,

При  $Z=h$   $U_z = -V$ , V – скорость перемещения инструмента, Отсюда  $K = -\frac{V}{h}$

$$U_z = -\frac{Vz}{h}$$



**Рисунок 1. Поле скоростей для первого этапа**

Допустим также радиальное течение металла в угол, т.е.  $U_\theta = 0$ . В цилиндрической системе координат при радиальном течении компоненты тензора скоростей деформации связа-

ны с полем скоростей соотношениями Коши:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}^z &= \frac{\partial U_z}{\partial z} = -\frac{V}{h}; \dot{\epsilon}^{\rho} = \frac{\partial U_{\rho}}{\partial \rho}; \dot{\epsilon}^{\theta} = \frac{U_{\rho}}{\rho}; \dot{\gamma}^z = \frac{\partial U_{\rho}}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial \rho} \\ \dot{\gamma}^{\rho\theta} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_{\rho}}{\partial \theta}; \dot{\gamma}^z\theta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} = 0;\end{aligned}$$

Используя условие постоянство объема:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}^z + \dot{\epsilon}^{\rho} + \dot{\epsilon}^{\theta} &= 0. \\ \dot{\epsilon}^{\rho} = \frac{\partial U_{\rho}}{\partial \rho} &= \frac{V}{2h} \left(1 + \frac{R_1^2}{\rho^2}\right); \dot{\epsilon}^{\theta} = \frac{U_{\rho}}{\rho} = \frac{V}{2h} \left(1 - \frac{R_1^2}{\rho^2}\right); \\ \dot{\epsilon}^z &= -\frac{V}{h}; \dot{\gamma}^{\rho\theta} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_{\rho}}{\partial \theta} = \frac{Vb^2 \sin(\theta_1 - \theta)}{h\rho^2 \cos^3(\theta_1 - \theta)}; \\ \dot{\gamma}^{\rho z} &= \dot{\gamma}^z\theta = 0.\end{aligned}$$

Аналогичным образом находим поле скоростей, а затем и компоненты тензора скоростей деформации для зоны 2:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}^{\rho} &= \frac{V}{2h} \left(1 + \frac{R_2^2}{\rho^2}\right); \dot{\epsilon}^{\theta} = \frac{U_{\rho}}{\rho} = \frac{V}{2h} \left(1 - \frac{R_2^2}{\rho^2}\right); \\ \dot{\epsilon}^z &= -\frac{V}{h}; \dot{\gamma}^{\rho\theta} = \frac{Va^2 \sin(\theta_2 - \theta)}{h\rho^2 \cos^3(\theta_2 - \theta)};\end{aligned}$$

Далее определяем составляющие мощности, развиваемые внутри очага деформации по поверхностям контакта с инструментом и на линиях разрыва касательной составляющей скорости.

Мощность пластической деформации:

$$N_i = \iiint_{(V)} b_i \dot{\epsilon}_i dV,$$

где  $b_i$  – интенсивность напряжений;  $\dot{\epsilon}_i$  – интенсивность скоростей деформации;  $V$  – объем очага деформации.

Интенсивность скоростей деформации:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}^{\rho} - \dot{\epsilon}^{\theta})^2 + (\dot{\epsilon}^{\theta} - \dot{\epsilon}^z)^2 + (\dot{\epsilon}^z - \dot{\epsilon}^{\rho})^2 + 3/2 \dot{\gamma}^{\rho\theta}^2}$$

Интенсивность напряжений является функцией накопленной деформации.

Весь процесс закрытой высадки прямоугольной в плане головки можно разбить на 3 этапа. На первом - от начала высадки до соприкосновения головки с ближней стенкой матрицы – можно считать, что протекает осисимметричная деформация и в конце его

$$\dot{\epsilon}^z_1 = \frac{\ln h_0}{h_1},$$

где  $h_1$  - высота головки в этот момент. На втором этапе – до соприкосновения металла с дальней стенкой матрицы – реализуется схема плоской деформации и  $\dot{\epsilon}^z_2 = 1,15 \dot{\epsilon}^z_1 = 1,15 \ln \frac{h_1}{h_2}$ , где  $h_2$  – высота головки в конце второго этапа. На третьем этапе происходит затекание в угол матрицы. Тут максимальной деформацией становится радиальная компонента. Учитывая, однако, что третий этап протяженности значительно меньше первых двух, примем приближенно  $\dot{\epsilon}_i = 1,15 \ln \frac{h_0}{h_k}$ , для всего процесса высадки ( $h_k$  – конечная высота головки).

В цилиндрических координатах  $\rho, \theta, z$  элементарный объем.

$$dV = \rho d\rho d\theta dz,$$

а пределы интегрирования в нашем случае:

по  $\rho$  – от  $r_1$  до  $R_1$  в зоне 1 и от  $r_2$  до  $R_2$  в зоне 2.

по  $\theta$  - 0 до  $\theta$  в зоне 1 и от 0 до  $\theta$  в зоне 2

по  $z$  – от 0 до  $h$ ,

где  $r_1$  определяется следующим образом (рисунок 2).

Пусть радиус закругления углового элемента головки в плане равен  $r$  (на рисунке 2.2 изображен общий случай, когда высаживаемая головка еще не касается стенок штампа). Тогда:

$$x^1 = m - x,$$

$$y^1 = n - y$$

из уравнения окружности  $x^2 + y^2 = r^2$  следует

$$y = \sqrt{r^2 - x^2}$$

Тогда:

$$y' = n - \sqrt{r^2 - x^2} = n - \sqrt{r^2 - (m - x')^2} = n - \sqrt{r^2 - m^2 + 2mx' - x'^2}.$$

Но  $y' = r_1 \sin \theta$ ,  $x' = r \cos \theta$

Следовательно,

$$n - \sqrt{r^2 - m^2 + 2m \cos \theta' - r_1^2 \cos^2 \theta'} = r_1 \sin \theta'.$$

Решая это уравнение относительно  $r_1$ , получим:

$$r_1 = (n \sin \theta' + m \cos \theta') - \sqrt{(n \sin \theta' + m \cos \theta')^2 - (m^2 + n^2 - r^2)},$$

$$r_1 = r (\sin \theta' + \cos \theta' - \sqrt{\sin^2 \theta' + \cos^2 \theta' - 2 \sin \theta' \cos \theta' - 1}).$$

После касания боковыми поверхностями головки стенок штампа  $m = n = r$ . Учтем также, что  $\theta' = \theta_1 - \theta$  в зоне 1 и что  $\theta' = \theta_2 - \theta$  в зоне 2. Тогда для зоны 1:

$$r_1 = r (\sin(\theta_1 - \theta) + \cos(\theta_1 - \theta) - \sqrt{\sin(\theta_1 - \theta)}).$$

Для зоны 2:

$$r_2 = r (\sin(\theta_2 - \theta) + \cos(\theta_2 - \theta) - \sqrt{\sin(\theta_2 - \theta)}).$$

Таким образом, формула для вычисления мощности пластической деформации прямоугольной в плане головки будет иметь следующий вид:

$$Ni = 4 \int_{r_1}^{R_1} \int_0^{\theta_1} \int_0^h \sigma_i \dot{\epsilon}_i \rho d \rho d \theta dz + 4 \int_{r_2}^{R_2} \int_0^{\theta_2} \int_0^h \sigma_i \dot{\epsilon}_i \rho d \rho d \theta dz.$$

Мощность, развиваемая силами трения на торцовых поверхностях головки, для поверхностей контакта с пуансоном  $N_{mp1}$  и матрицей  $N_{mp2}$

$$N_{mp1} = 4 \int_{r_1}^{R_1} \int_0^{\theta_1} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta + 4 \int_{r_2}^{R_2} \int_0^{\theta_2} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta;$$

$$N_{mp2} = 4 \int_{r_1}^{r_{01}} \int_0^{\theta_1} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta + 4 \int_{r_1}^{R_1} \int_{\theta_1}^{\theta_1} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta + \\ + 4 \int_{r_2}^{r_{02}} \int_0^{\theta_2} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta + 4 \int_{r_1}^{R_1} \int_{\theta_2}^{\theta_1} \mu \sigma_i U_\rho \rho d \rho d \theta,$$

где  $\theta_1 = \theta_1 - \arctg \frac{a-d}{b}$ ;  $\theta_2 = \theta_{12} - \arctg \frac{b-d}{b}$ .

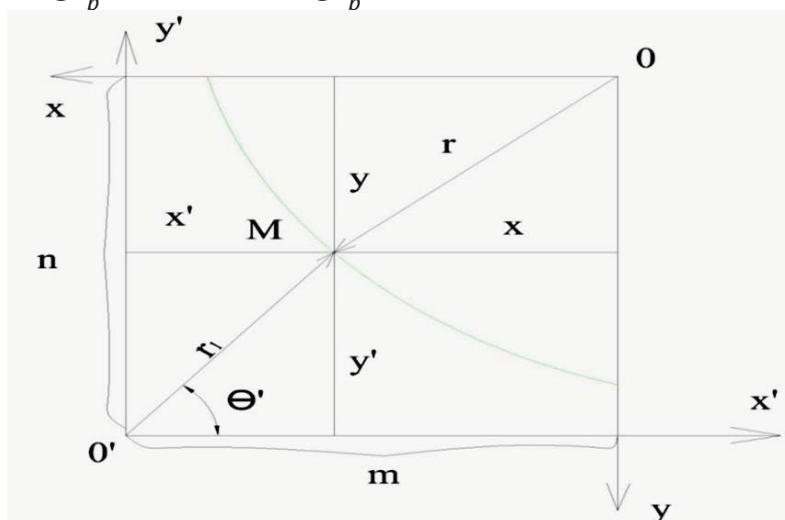


Рисунок 2. Поле скоростей для второго этапа

Мощность, развиваемая силами трения металла о боковые стенки матрицы, следует вычислять по формуле:

$$N_{mp3} = 4 \int_{r_1}^b \int_0^h \mu \sigma_i (U_\rho^2 + U_z^2) \rho d \rho dz + 4 \int_{r_2}^a \int_0^h \mu \sigma_i (U_\rho^2 + U_z^2) \rho d \rho dz$$

Наконец, мощность, развиваемая силами среза на границе между головкой и стерж-

нем исходной заготовки, определяется как :

$$N_{cp} = 4 \int_{r_{01}}^{R_1} \int_0^{\theta_1} \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} U_p \rho dr d\theta + 4 \int_{r_2}^{R_2} \int_0^{\theta_2} \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} U_p \rho dr d\theta;$$

Баланс мощности выглядит следующим образом:

$$PV = N_i + N_{mp1} + N_{mp2} + N_{mp3} + N_{cp},$$

где P - усилие деформации, которое и находим из этого баланса.

### Выводы

Сила высадки увеличивается с уменьшением радиуса закругления головки в плане и уменьшением ее высоты. Отношение размеров  $\frac{b}{a}$  влияет на усилие значительно слабее, причем с его уменьшением усилие снижается: схема деформации все более приближается к плоской осадке, и все меньшую роль играет выдавливание металла в угловой элемент штампа в плане.

### Литература

1. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К., Гипп Л.Б. Высадка стержневых деталей с прямоугольной в плане головкой - Механика деформированного тела и обработка металлов давлением, 2000г
2. Холодная объемная штамповка. справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого, В.А.Головина, А.Ф.Нистратова. М.: Машиностроение, 1973. 496 с.
3. Филиппов Ю.К., Игнатенко В.Н., Головина З.С., Анюхин А.С., Рагулин А.В., Гневашев Д.А. Теоретическое исследование комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 7. С. 3-7.
4. Типалин С.А. Экспериментальное исследование процесса выдавливания технологической канавки в оцинкованной полосе / Известия МГТУ «МАМИ» 2012. Т.2 .№2. С.208-213.
5. Филиппов Ю.К., Игнатенко В.Н., Головина З.С., Рагулин А.В., Анюхин А.С., Гневашев Д.А. Экспериментальное исследование течения металла при комбинированном процессе радиального и обратного выдавливания в конической матрице / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 9. С. 33-35.
6. Филиппов Ю.К., Молодов А.В. Моделирование процессов холодного комбинированного выдавливания полусферических деталей с фланцем / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 5 . С.27-30.
7. Петров М.А., Петров П.А., Калпин Ю.Г. Численное исследование трения при высадке с радиальным выдавливанием деталей типа «Стержень с утолщением» из алюминиевого сплава АД1. / Известия МГТУ «МАМИ» 2012. Т.1 .№1. С.200-210.
8. Соболев Я.А., Филиппов Ю.К., Рагулин А.В., Молодов А.В. Исследование различных типов смазки при холодном обратном выдавливании / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. №2. С.166-170.
9. Филиппов Ю.К. Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой. / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 1999. № 2 . С. 3.
10. Крутина Е.В., Калпин Ю.Г. Определение пластичности металлов методом комбинированного поперечного выдавливания и высадки / Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т.2. №2. С.95-98.

### **Определение напряжений в слоях листовой детали при правке давлением**

к.т.н. доц. Рябов В.А

Университет машиностроения  
(495) 223-05-23 v.a.ryabov@mami.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрено определение напряжений при правке листовых деталей давлением.

*Ключевые слова:* напряжения, усилие