

## ВЕРХНЯЯ ОЦЕНКА УДЕЛЬНЫХ СИЛ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НИЗКИХ ПОКОВОК В ЗАКРЫТЫХ ШТАМПАХ

Антонюк Ф.И.<sup>1</sup>, Логутенкова Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Россия (248600, Калуга, ул. Баженова, 2), e-mail: iwtbhn@mail.ru

Изложены результаты исследования силовых параметров осадки относительно низких поковок в закрытых штампах. Получены зависимости для определения удельных сил от размеров низких поковок, условий контактного трения и степени заполнения углов закрытого штампа. Верхние оценки удельных сил определены с помощью кинематически возможного поля скоростей и соответствуют экспериментально наблюдаемым зонам интенсивной пластической деформации. Максимальная относительная высота низких поковок, с учетом условий контактного трения и величины радиусов в углах поковок, определена минимизацией верхней оценки удельных сил. Получены достаточно простые и компактные расчетные зависимости, структура которых отражает влияние основных технологических параметров на величину удельных сил. Метод верхней оценки использовался с применением единичных деформируемых областей и позволил выявить количественную характеристику относительной высоты низких поковок, изготавливаемых в закрытых штампах.

Ключевые слова: осадка, удельные силы, закрытая штамповка, пластическая деформация, поковки, трение.

## UPPER BOUNDS SPECIFIC FORCES COLD FORMING LOW FORGINGS IN CLOSED DIES

Antonyuk F.I.<sup>1</sup>, Logutenkova E.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University n.a. Bauman, Kaluga Branch, Russia (248600, Kaluga, street Bazhenova, 2), e-mail: iwtbhn@mail.ru

The results of investigation of power parameters of relatively low rainfall in closed-die forgings. The dependencies to determine the specific forces on the size of the low forgings, contact friction conditions and the degree of filling of the corners of the closed die. Upper bounds specific forces determined by the velocity field is kinematically possible and meet the experimentally observed zones of intense plastic deformation. Maximum height low forgings, subject to the conditions of contact friction and the radius in the corners of forgings, determined by minimization of the upper bound of the specific forces. Obtain rather simple and compact design dependence, the structure of which reflects the influence of the main technological parameters on the specific forces. The method of assessment used by the top using a single deformable regions and revealed a quantitative characterization of the relative height of the low forgings produced in closed dies.

Keywords: upsetting, specific force, closed stamping, plastic deformation, forging, friction.

Холодная объемная штамповка относится к наиболее эффективным ресурсосберегающим технологиям заготовительного производства в машиностроении. Применение таких технологических операций, как высадка, выдавливание и штамповка в закрытых штампах позволяет повысить коэффициент использования материала до 90...95% и, значительно, в 3...5 раз снизить трудоемкость последующей механической обработки.

Однако область применения холодной объемной штамповки ограничена не только осесимметричной формой штампуемых поковок, но, прежде всего, величиной удельных деформирующих сил, допускаемых прочностью и экономически целесообразной стойкостью материалов рабочих деталей штампов [ $p \leq 2000...2500$  МПа]. Поэтому надежное прогнозирование удельных сил приобретает первостепенное значение при проектировании

технологических операций и разработке конструкций штампов, в первую очередь, для выдавливания и штамповки в закрытых штампах.

Несмотря на это, в специальной справочной литературе, в отличие от операций выдавливания, отсутствуют функциональные зависимости, позволяющие с достаточной для практических целей точностью оценить величину удельных деформирующих сил при холодной штамповке поковок в закрытых штампах [3].

Вместе с тем, следует отметить значительный вклад в теорию и практику закрытой штамповки А.З. Журавлева [2]. В своей монографии он изложил результаты исследования характера формоизменения поковок при заполнении углов закрытого штампа и предложил зависимости для определения удельных сил относительно низких и высоких поковок. Однако, они не нашли широкого применения из-за некоторой громоздкости и сложности.

Большое значение для дальнейшего развития теории закрытой штамповки имеют экспериментальные исследования А.З. Журавлева, выявившие, что расположение зон интенсивной пластической деформации в теле поковок зависит от их относительной высоты. В высоких поковках очаги пластической деформации (ОПД) расположены у торцов, соединяя свободные поверхности в прилегающих углах. В низких - ОПД расположен вдоль образующей цилиндрической поверхности поковок, соединяя свободные поверхности в верхних и нижних углах закрытого штампа.

А.З. Журавлев разделил все поковки в зависимости от их относительной высоты на низкие ( $H/D \leq 0,2$ ) и высокие ( $H/D \geq 0,2$ ), и с учетом такого критерия предложил формулы для определения удельных сил. При этом автор исходил из предложения, что по аналогии с обратным выдавливанием, при закрытой штамповке высота ОПД под пуансоном зависит от диаметра последнего. Однако более поздние исследования А.Л. Воронцова показали, что высота ОПД при обратном выдавливании зависит от толщины стенки выдавливаемого стакана, при закрытой штамповке – от величины радиусов в углах закрытого штампа [1].

В своей монографии А.Л. Воронцов показал, что при разделении поковок на низкие и высокие следует, наряду с их высотой и диаметром, учитывать также величину радиусов на кромках поковок. Автор отметил особенность, присущую формоизменению низких поковок, которая проявляется в практически равной величине верхних и нижних радиусов.

Такой вывод имеет большое значение при создании кинематической модели деформирования в закрытом штампе низких поковок. Следует отметить, что анализ типоразмеров поковок, штампуемых в закрытых штампах, показывает, что значительную часть из них (~40%) составляют относительно низкие поковки. Поэтому исследование

силовых параметров штамповки относительно низких поковок в закрытых штампах является актуальной проблемой.

### Постановка задачи

Цель выполненной работы - исследование удельных деформирующих сил низких поковок в закрытых штампах. При этом критерий отнесения поковок к низким, наряду с относительной высотой, должен быть дополнен не только величиной радиусов в верхних и нижних кромках, но и учитывать условия контактного трения в рабочей полости штампа.

### Решение задачи методом верхней оценки

Поставленная задача решена методом верхней оценки с использованием единичных деформируемых прямоугольных областей (ячеек), из которых состоит кинематически возможное поле скоростей (КВПС) [4,5]. Известно, что надежность результатов при решении задач подобным методом достигается путем использования экспериментально наблюдаемых полей скоростей. Поэтому при построении КВПС основывались на экспериментальных исследованиях А.Л. Воронцова и А.З. Журавлева. На рис.1 представлены КВПС для высокой (рис.1а) и низкой (рис.1б) поковок.

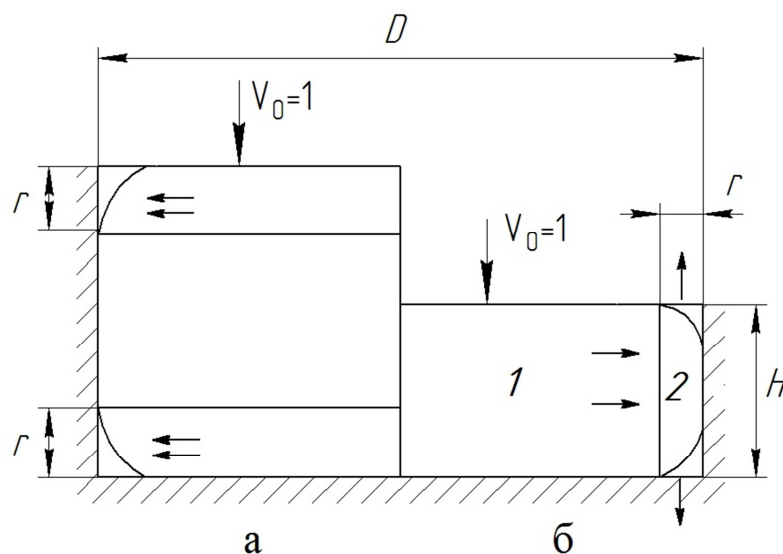


Рис. 1. Кинематически возможные поля скоростей для высокой (а) и низкой (б) поковок

Анализируя КВПС для низкой поковки, видно, что оно состоит из двух областей, деформируемых подобно осадке полосы в условиях плоской деформации. Минимизированные верхние оценки удельных сил для осадки полосы тривиальны и известны [5]. Они минимизированы углами жестких треугольных блоков, взаимное скольжение которых имитирует пластическую деформацию осадки полосы. Затем единичные области (ячейки) объединяют в целую поковку с одним неизвестным размером. Таким размером в данной задаче является высота ОПД ( $H_0$ ), равная высоте деформируемой

низкой поковки ( $H_0 = H$ ). Искомую высоту  $H_0$  достаточно просто определить из условия минимизации верхней оценки удельной деформирующей силы [5].

В соответствии с размерами поковки, обозначенными на рис.1б запишем выражения для относительных (далее - удельных) сил деформирования осадкой прямоугольных полос 1 и 2 соответственно:

$$\frac{p_1}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left( 1 + \frac{\mu \cdot (D - 2 \cdot r)}{2 \cdot H_0} \right); \quad (1)$$

$$\frac{p_2}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left( 1 + \frac{\mu \cdot H_0}{2 \cdot r} \right); \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  - текучести упрочняемого материала с учетом интенсивности деформации,  $\mu$  - коэффициент контактного трения в полости штампа,  $r$  - радиусы на кромках поковки.

Так как скорости, действующие на области 1 и 2, ортогональны, то удельная сила деформирования относительно низкой поковки в закрытом штампе, с учетом коэффициента трения на их границе ( $\mu = 0,5$ ), определяется суммированием (1) и (2):

$$\frac{p}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left( 2 + \frac{\mu \cdot (D - 2 \cdot r_0)}{2 \cdot H_0} + \frac{(1 + 2 \cdot \mu) \cdot H_0}{8 \cdot r_0} \right). \quad (3)$$

Высоту очага пластической деформации ( $H_0$ ), равную высоте низкой поковки найдем из условия минимума верхней оценки удельной силы деформирования:

$$\frac{\partial \left( \frac{p}{\sigma_s} \right)}{\partial H_0} = 0.$$

В результате получим:

$$H_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{(1 + 2 \cdot \mu)} \cdot (D - 2 \cdot r) \cdot r}. \quad (4)$$

Однако следует принять во внимание, что штамповка в закрытом штампе является процессом стесненной осадки, которая начинается, когда боковая поверхность осаживаемой заготовки коснется вертикальной стенки штампа. Это накладывает на максимальную величину радиуса в углах поковки следующее ограничение:

$$H_0 \geq 2 \cdot r_0. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) можно записать:

$$\sqrt{\frac{\mu}{(1 + 2 \cdot \mu)} \cdot (D - 2 \cdot r) \cdot r} \geq r_0. \quad (6)$$

Отсюда следует:

$$r_0 \leq \frac{k}{(1+2 \cdot k)} \cdot D, \quad (7)$$

$$\text{где } k = \frac{\mu}{(1+2 \cdot \mu)}.$$

Используя формулу (7) с учетом (5) можно определить максимальную относительную высоту низких поковок:

$$\frac{H}{D} \leq 2 \cdot \frac{k}{(1+2 \cdot k)}. \quad (8)$$

Таким образом, из анализа (7) и (8) видно, что максимальная относительная высота низкой поковки и соответствующая ей величина радиуса ( $r_0$ ) зависят от коэффициента контактного трения в полости закрытого штампа. Для дальнейших расчетов величина коэффициента трения принята в соответствии с рекомендациями, содержащимися в специальной справочной литературе. В частности, для сплавов меди и алюминия:  $\mu = 0,1$  - с применением смазочного материала,  $\mu = 0,3$  - без смазочного материала [3].

С учетом коэффициента трения, в соответствии с (8) можно определить относительную высоту низких поковок:  $H/D \leq 0,142$  ( $\mu = 0,1$ ) и  $H/D \leq 0,272$  ( $\mu = 0,3$ ).

Для определения величины удельных деформирующих сил низких поковок в закрытых штампах следует пользоваться расчетной формулой (3).

Выполняя расчеты необходимо учитывать, что последовательное деформирование поковки сопровождается уменьшением ее высоты вследствие заполнения углов закрытого штампа. Такое уменьшение высоты можно учесть, исходя из условия постоянства объема исходной заготовки. Например, расчеты показывают, что для поковки диаметром 60мм и высотой 8,6мм, при изменении радиуса с 4,0мм до 0,5мм уменьшение ее высоты составляет 10%.

На рис.2 показаны графики изменения удельных сил относительно низких поковок ( $H/D = 0,14$ ) диаметром 60мм (сплошной линией) и 30мм (пунктирной линией). Начальный максимальный радиус первой поковки равен 4,0мм, а второй – 2,5мм. В расчетах коэффициент трения принят равным 0,1.

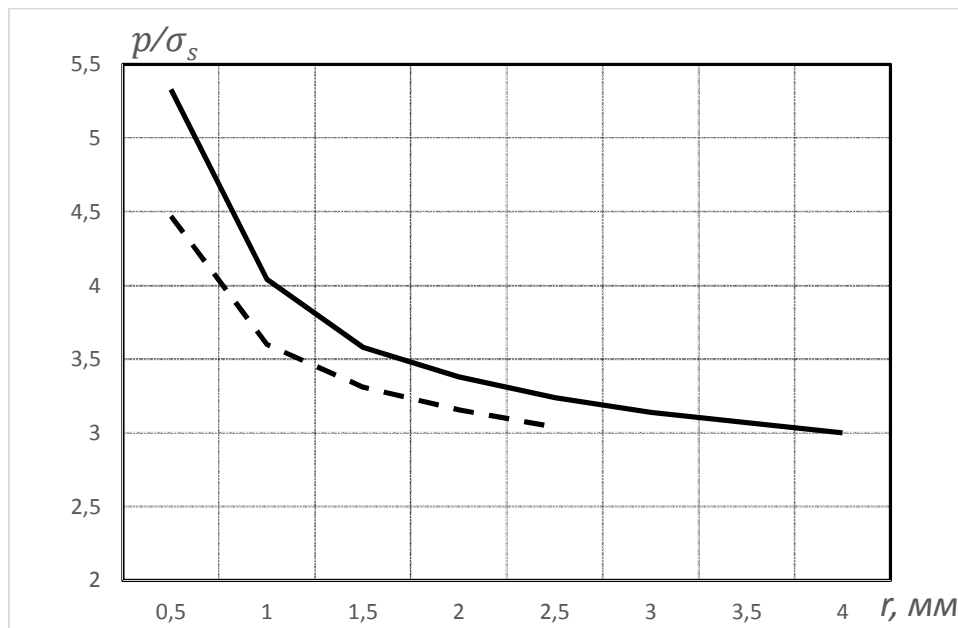


Рис.2 Графики удельных сил относительно низких поковок

Анализ графиков показывает, что при равенстве относительной высоты ( $H/D$ ), а также радиусов в углах поковок ( $r$ ), удельные силы деформирования поковки диаметром 60мм больше, чем поковки диаметром 40мм. Это объясняется различной величиной относительных размеров очага пластической деформации ( $H/r$ ) у вертикальной стенки штампа. В формуле (3) второе слагаемое отражает влияние указанного параметра на величину удельной силы относительно низких поковок.

### Выводы

1. Методом верхней оценки получены зависимости, позволяющие определить величину удельных сил деформирования в закрытых штампах относительно низких поковок с учетом их размеров, условий контактного трения и величины радиусов в углах поковок.

2. На основе минимизации верхней оценки удельных сил деформирования низких поковок определена максимальная величина их относительной высоты с учетом коэффициента контактного трения в штампе и максимальной величины радиусов в углах поковок. В частности, если коэффициент  $\mu = 0,1$ , тогда максимальная относительная высота низких поковок равна 0,142. Она возрастает до 0,272 при увеличении коэффициента трения до  $\mu = 0,3$ .

### Список литературы

1. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учебное пособие: в 2т. / А.Л. Воронцов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

2. Журавлев А.З. Основы штамповки в закрытых штампах. М.: Машиностроение, 1973. 224с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.Т.3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого, - М.: Машиностроение, 1987. 384с.
4. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением.– М.: Машиностроение, 1979г. 215с.
5. Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. и др. Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598с.

**Рецензенты:**

Астахов М.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика», Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Калуга.

Шаталов В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов», Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Калуга.