

## ВЕРХНЯЯ ОЦЕНКА УДЕЛЬНЫХ СИЛ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫДАВЛИВАНИЕМ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ФЛАНЦАМИ

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

Рассмотрена двухоперационная технология изготовления стержневых изделий с фланцами. Проанализирован процесс деформации поковок с использованием комбинированной операции закрытой осадки и выдавливания. Получены аналитические зависимости для определения удельных сил штамповки выдавливанием стержневых изделий с фланцами через плоскую матрицу. Задача решена методом верхней оценки с использованием единичных прямоугольных деформируемых областей (ячеек). Рассмотрен механизм деформации единичных областей, которые представляют собой прямоугольные полосы. При решении учитываются условия трения между ячейками и на контакте с поверхностью полости штампа. Определено влияние отношения диаметров фланца и стержня, условий трения в штампе, а также относительной высоты фланца на величину удельных сил на стационарной и нестационарной стадиях процесса штамповки выдавливанием.

Ключевые слова: верхняя оценка, штамповка выдавливанием, плоская матрица, удельные силы.

## UPPER BOUNDS SPECIFIC FORCES COLD EXTRUDING ROD ARTICLES WITH A HEADS

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

Docoperations core manufacturing technology products with flanges considered. The deformation process forgings analyzed using combined operation closed upsetting and extrusion. Analytical dependences for determining the specific forces extruding rod articles with flanges through a flat matrix received. The problem is solved by the upper bound using a single rectangular deformable areas (cells). The mechanism of deformation of the individual areas that are rectangular bands reviewed. At the decision takes into account the conditions of friction between the cells and at the contact with the die cavity. The effect of the ratio of the diameters of the flange and rod friction conditions in the die, also the height of the flange on the value of specific forces on stationary and non-stationary stages of extruding defined.

Keywords: upper bounds, extruding, flat matrix, specific forces.

Для изготовления на прессах стержневых изделий с фланцами с большим отношением их диаметров ( $D/d > 3...3,5$ ) для повышения эффективности формоизменения применяют двухоперационную технологию. На первой прямым выдавливанием получают стержень с утолщением ( $1,2 \leq D/d \leq 2,0$ ), а на второй, комбинированной операции, закрытой осадкой увеличивают диаметр утолщения до размеров фланца. Процесс осадки утолщения при этом сопровождается истечением некоторой части объема материала в стержень [4]. Простую операцию прямого выдавливания и комбинированную – закрытую осадку с выдавливанием объединяет не только наличие плоской матрицы, но и подобная схема деформирования заготовки в конечный момент процесса штамповки. Это позволяет для исследования силовых параметров указанных операций использовать одну расчетную схему, например, кинематическую модель прямого выдавливания через плоскую матрицу.

Несмотря на широкое применение холодной штамповки выдавливанием через плоскую матрицу, в специальной справочной литературе отсутствуют рекомендуемые к практическому использованию расчетные зависимости для определения удельных деформирующих сил [2].

Известно, что операции выдавливания характеризуются преобладающим влиянием сжимающих напряжений в очаге пластической деформации. Это повышает сопротивление сплавов пластической деформации. Поэтому удельные деформирующие силы настолько велики, что могут превышать уровень, допускаемый прочностью материалов рабочих деталей штампов. Это обстоятельство предопределяет высокие требования к точности расчета полных и удельных сил.

Следует отметить достаточно большое количество теоретических и экспериментальных работ по исследованию силовых параметров прямого прессования прутков, которое по механизму деформирования принципиально не отличается от штамповки выдавливанием, однако, наряду с этим имеет и существенные отличия.

Прессование прутков выполняется на устоявшейся, стационарной стадии процесса, когда высота пресс-остатка всегда больше высоты очага пластической деформации, и вследствие этого удельная сила практически постоянна на длине рабочего хода плунжера.

При штамповке выдавливанием расстояние между торцевой поверхностью пуансона и дном матрицы обусловлено заданной высотой фланцев штампуемых заготовок, которая соизмерима с высотой очага пластической деформации. Таким образом, процесс штамповки прямым выдавливанием может выполняться как на стационарной, так и на нестационарной стадиях. В последнем случае деформирующие силы возрастают с уменьшением высоты фланцев и, как свидетельствует практика, при этом увеличивается влияние условий трения в штампе.

Следует отметить, что наиболее всесторонние теоретические и экспериментальные исследования штамповки выдавливанием через плоскую матрицу выполнил Л.А. Шофман [5]. Автор рассмотрел обе стадии процесса, применив для анализа, как метод линий скольжения, так и метод верхней оценки с использованием полей скоростей жестких треугольников. Однако при этом он учитывал смешанные граничные условия трения, присущие только процессу прессования прутков. Кроме того, предложенные Л.А. Шофманом формулы для приближенных расчетов высоты очага пластической деформации и величины удельных сил на нестационарной стадии выдавливания не учитывают контактное трение в полости штампа.

Изложенный анализ обосновывает актуальность исследования силовых параметров штамповки выдавливанием стержневых изделий с фланцами.

### Постановка задачи

Цель выполненной работы – используя метод верхней оценки получить в аналитической форме расчетные зависимости для определения удельных сил штамповки прямым выдавливанием стержневых изделий с фланцами с учетом высоты последних и условий трения в штампе.

### Решение задачи методом верхней оценки

Поставленная задача решена методом верхней оценки с использованием единичных деформируемых прямоугольных областей (ячеек), составляющих кинематически возможное поле скоростей, показанное на рис. 1.

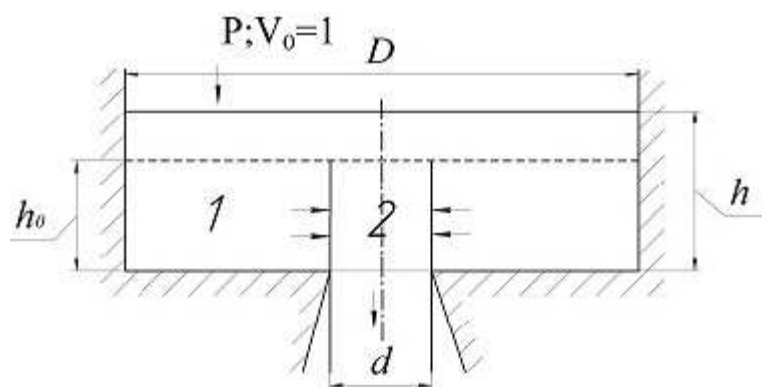


Рис. 1 Кинематически возможное поле скоростей

Каждая единичная область представляет собой прямоугольную полосу, деформируемую в условиях плоской деформации свободной или односторонней осадкой. Механизм деформации полосы обеспечивается взаимным скольжением жестких треугольных блоков. Верхние оценки удельных сил осадки полосы известны. Они минимизированы углами треугольных блоков [3]. При образовании очага пластической деформации учитывают условия трения между блоками и на контакте с поверхностью штампа. Удельные силы деформирования каждой полосы приведены к единичной скорости ( $V_0 = 1$ ) и единичной поверхности, передающей нагрузку ( $D$ ). Один из размеров очага деформации не фиксируется, например,  $h_0$ . Его находят из условия минимизации верхней оценки.

Если единичные деформируемые области ортогональны, тогда указанные коэффициенты приведения представляют собой взаимнообратные величины и, вследствие этого средняя удельная сила выдавливания определяется суммированием приведенных удельных сил деформирования единичных областей [1].

Учитывая обозначения размеров деформируемой поковки на рис.1, можно определить для единичной области 1 относительную удельную (далее - удельную) силу деформирования на установившейся стационарной стадии выдавливания:

$$\frac{p}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left( 1 + \frac{(2 \cdot \mu + 1) \cdot (D - d)}{8 \cdot h_0} \right) \cdot \left( \frac{D - d}{D} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  - напряжение текучести упрочняемого материала поковки с учетом интенсивности деформации;  $D$  и  $d$  - соответственно диаметр фланца и стержня;  $\mu$  - коэффициент контактного трения;  $h_0$  - высота очага пластической деформации.

Удельная сила деформирования области 2 с учетом условия неразрывности определится по формуле (2):

$$\frac{p}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left( 1 + \frac{h_0}{2 \cdot d} \right) \cdot \left( \frac{D - d}{D} \right); \quad (2)$$

Удельная сила прямого выдавливания через плоскую матрицу на стационарной стадии определяется суммированием (1) и (2):

$$\frac{p}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left[ \left( 2 + \frac{(2 \cdot \mu + 1) \cdot (D - d)}{8 \cdot h_0} + \frac{h_0}{2 \cdot d} \right) \cdot \frac{D - d}{D} + \frac{(2 \cdot \mu + 1) \cdot h_0}{2 \cdot D} \right]. \quad (3)$$

В формуле (3) последнее слагаемое учитывает влияние трения на вертикальной стенке матрицы ( $\mu = 0,1$ ), а также на границе областей 1 и 2 ( $\mu = 0,5$ ).

Высоту очага пластической деформации ( $h_0$ ) найдем из условия минимизации

верхней оценки (3), приравняв  $\frac{\partial \left( \frac{p}{\sigma_s} \right)}{\partial h_0}$  к нулю.

В результате получим:

$$h_0 = \frac{D - d}{2} \cdot \sqrt{\frac{d \cdot (2 \cdot \mu + 1)}{D - d + d \cdot (2 \cdot \mu + 1)}}. \quad (4)$$

Удельная сила выдавливания на заключительной, нестационарной стадии ( $h < h_0$ ), с учетом изменившихся условий трения на торцевой поверхности фланца, будет равна:

$$\frac{p}{\sigma_s} = 1,15 \cdot \left[ \left( 2 + \frac{\mu \cdot (D - d)}{2 \cdot h} + \frac{h}{2 \cdot d} \right) \cdot \frac{D - d}{D} + \frac{(2 \cdot \mu + 1) \cdot h}{2 \cdot D} \right]. \quad (5)$$

Используя полученные функции (4) и (5), выполнен анализ силовых параметров штамповки выдавливанием через плоскую матрицу стержневых изделий с фланцами на нестационарной стадии.

На рис.2 представлена зависимость относительной высоты очага пластической деформации ( $h_0/d$ ) от величины коэффициента контактного трения и отношения  $D/d$ . В

расчетах по формуле (4) принято возможное изменение коэффициента трения для меди М1 и сплава АД1: со смазочным материалом ( $\mu=0,1$ ) и без него ( $\mu=0,3$ ) [2].

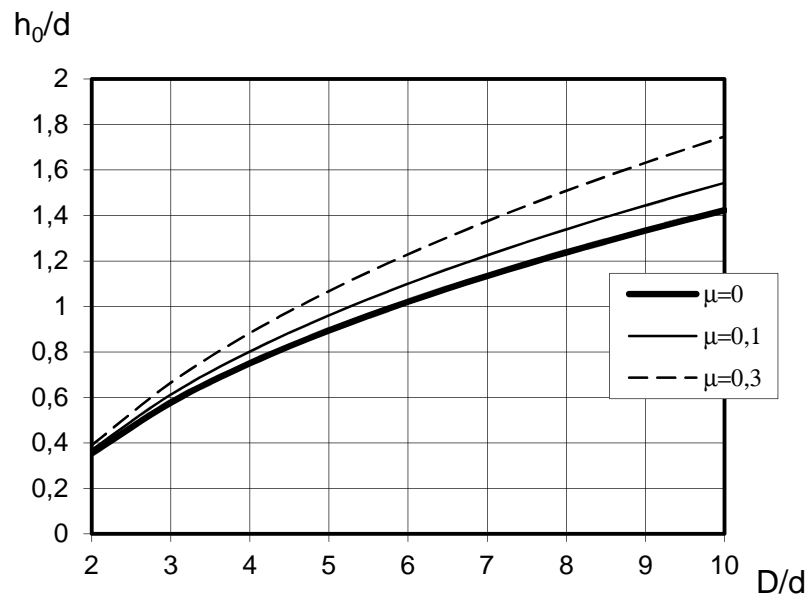


Рис. 2. Зависимость относительной высоты очага пластической деформации от отношения

$D/d$  и коэффициента трения

Из графиков на рис. 2 видно, что влияние коэффициента трения на высоту очага деформации возрастает с увеличением отношения  $D/d$ .

На рис. 3 показана зависимость удельных сил выдавливания от отношения  $D/d$  и коэффициента трения в начальный момент нестационарной стадии, когда высота фланцев соответствует высоте очага пластической деформации. Расчет выполнен по формулам (4) и (5). Из анализа графиков можно заключить, что влияние коэффициента трения на величину удельных сил также возрастает с увеличением отношения диаметров фланца и стержня ( $D/d$ ).

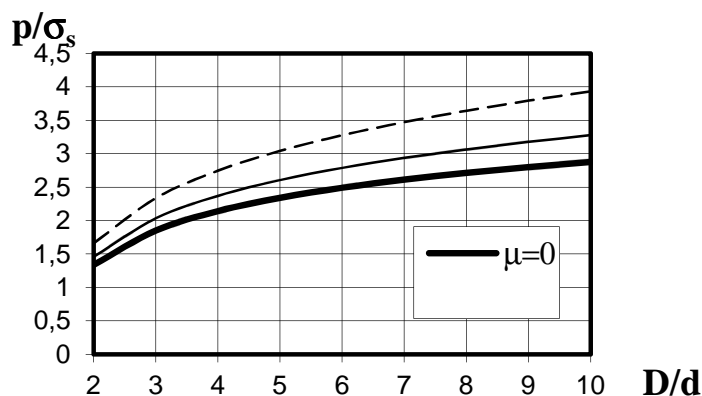


Рис.3. Зависимость удельных сил выдавливания от отношения  $D/d$  и коэффициента трения

На рис.4 графики отражают влияние высоты фланца ( $h$ ) и коэффициента трения на величину удельной силы выдавливания. Расчеты выполнены по формуле (5) для  $D/d=5$  и  $D/d=3,125$  ( $D=25$  мм,  $d=5$  и 8 мм).

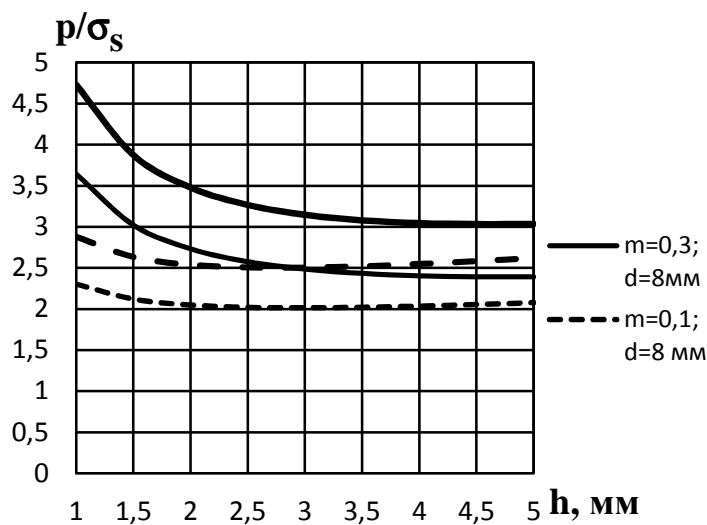


Рис.4. Графики влияния высоты фланца на величину удельной силы выдавливания на нестационарной стадии

Из анализа графиков следует, что влияние уменьшения высоты фланца на увеличение удельной силы на нестационарной стадии зависит от величины коэффициента трения. С его увеличением указанное влияние на возрастание удельной силы увеличивается.

#### Выводы

1. На основе метода верхней оценки получены зависимости для определения удельных сил штамповки выдавливанием через плоскую матрицу стержневых изделий с фланцами на стационарной и нестационарной стадиях процесса.

2. Основываясь на аналитических зависимостях, отражающих величину удельных деформирующих сил, выполнен анализ влияния отношения диаметров фланца и стержня, а также высоты фланцев и условий контактного трения в штампе на величину удельных сил на заключительной, нестационарной стадии процесса выдавливания через плоскую матрицу.

### Список литературы

1. Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В. Верхняя оценка удельных сил холодной объемной штамповки низких поковок в закрытых штампах // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.Т.3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого, - М.: Машиностроение, 1987. 384 с.
3. 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. 598 с.
4. Холодная объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого – М.: Машиностроение, 1973. 496 с.
5. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. – 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1964. 375 с.

### 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.