

## Определение потребной силы деформирования при штамповке поковок типа стержня с полусферическим фланцем

Сидоров А. А.<sup>1,а</sup>, Белокуров О. А.<sup>2,б</sup>

<sup>1</sup> ООО «ТЕСИС»,

Россия, 125083, г. Москва, ул. Юннатов, 18, офис 701

<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана,

Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

E-mail: <sup>а</sup>sidorow@tesis.com.ru

<sup>б</sup>obelokurov@mail.ru

Получено 30 июня 2014 г.

В статье проведено исследование энергосиловых параметров штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем, штампуемых на ГКМ, методом конечно-элементного анализа в системе DEFORM-2D и методом верхней оценки. На основе данного исследования приведена методика определения потребной силы деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем.

Ключевые слова: высадка, волокнистое строение, математическое моделирование высадки

### Load-stroke determination for hemispherical flange forming

A. A. Sidorov<sup>1</sup>, O. A. Belokurov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TESIS ltd, off. 701, 18 Unnatov str., Moscow, 125083, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2<sup>nd</sup> Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

**Abstract.** — In the paper the research of the energy and load-stroke parameters of the hemispherical flange forming on the horizontal forging machines has been presented. The Final Element Analysis and Upper Bound Method have been used. On the background of the research the methodic of the load-stroke determination of the hemi-spherical flange upset.

Keywords: upset, flow lines, horizontal forging machines, upset simulation

## Введение

Осесимметричные поковки для деталей типа стержня с утолщением представляют собой распространенный вид поковок, используемых в машиностроении.

К ним относятся поковки полуосей автомобилей, валиков коробок передач, валов и коленчатых валов с фланцем. Классификация осесимметричных поковок типа стержня с утолщением рассмотрена в [Семенов и др., 1986].

Одним из видов таких поковок являются поковки типа стержня с полусферическим фланцем (рис. 1).

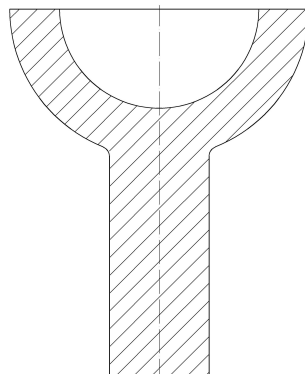


Рис. 1. Поковка типа стержня с полусферическим фланцем

Детали, изготавливаемые из этих поковок, применяют в автомобильной, приборостроительной и авиационной отраслях промышленности в конструкциях различного рода шарниров (в частности как основа шаровой опоры). Эти детали являются ответственными деталями машин, при выходе из строя которых может произойти авария.

Ранее в работе [Сидоров, 2009] были приведены результаты исследования влияния различных схем деформирования на волокнистое строение поковок типа стержня с полусферическим фланцем. Была получена картина волокнистого строения поковок, получаемых вытяжкой полусферы из плоского фланца с большими соотношениями диаметра фланца к его высоте ( $D/H$ ) и обратным выдавливанием полусферы из плоского фланца с малым  $D/H$ , для различного типоразмеров поковок.

Помимо картины волокнистого строения для различных типоразмеров поковок типа стержня с полусферическим фланцем важным показателем, характеризующим процесс штамповки на ГКМ, является потребная сила деформирования, характеризующая возможность осуществления данной технологической операции на имеющемся технологическом оборудовании.

В данной работе представлена методика расчета потребной силы деформирования высадки поковки типа стержня с полусферическим фланцем на ГКМ.

## Методика определения потребной силы деформирования методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе DEFORM-2D

Построение двумерной осесимметричной конечно-элементной модели процесса штамповки поковки типа стержня с полусферическим фланцем включает в себя следующие этапы:

- Построение геометрической модели высадочного штампа.

В связи с тем, что в рамках решения задачи определения потребной силы деформирования задача расчета стойкости и ресурса долговечности инструмента не решается, геометрическая модель штампа (рис. 2) значительно упрощена.

Матрица представляет собой неподвижное, абсолютно жесткое тело.

Пуансон представляет собой тело, движущееся с переменной во времени скоростью  $V = f(t)$ , определяемой по кинематической схеме работы ГKM, абсолютно жесткое тело.

- Построение конечно-элементной модели заготовки.

Конечно-элементная модель заготовки представляет собой вязкопластическое тело, объем которого разбит на 1000 конечных элементов.

Внешние узлы сетки конечных элементов, находящиеся на нижнем торце заготовки, зафиксированы.

Взаимодействие заготовки с инструментом описывается гибридной моделью трения, сочетающей в себе закон трения Амантона–Кулона и закон трения Зибеля:

$$\tau_k = \begin{cases} \mu p : \mu p < mk, \\ mk : \mu p \geq mk, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau_k$  — внешние удельные касательные силы;  $\mu$  — коэффициент трения согласно закону трения Амантона–Кулона;  $m$  — фактор трения согласно закону трения Зибеля;  $k$  — максимальное касательное напряжение в материале,  $p$  — нормальное давление материала на стенку инструмента.

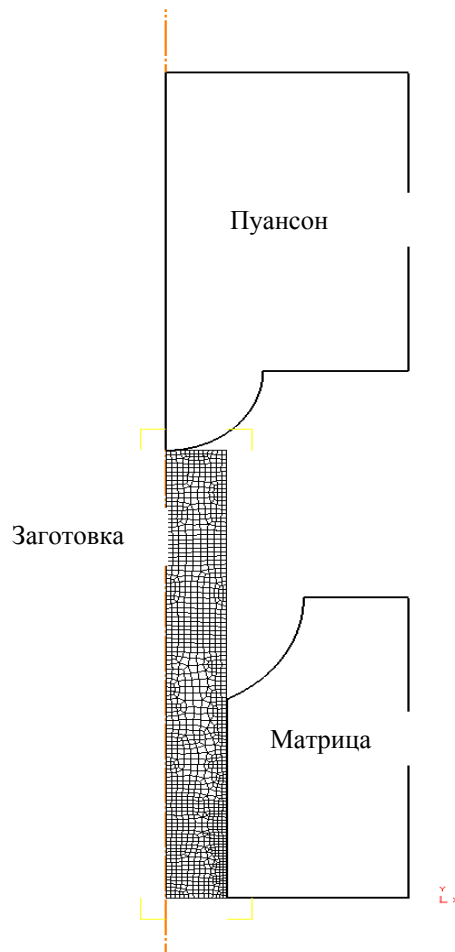


Рис. 2. Геометрическая модель штампа

- Построение реологической модели материала.

Реологическая модель вязко-пластичного материала определяется по следующему уравнению:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^u \cdot \dot{\varepsilon}^z + \sigma_0, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $u$ ,  $z$  — поправочные коэффициенты уравнения;  $\varepsilon$  — накопленная деформация;  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации;  $\sigma_0$  — предел текучести материала.

## Методика определения потребной силы деформирования методом верхней оценки

Метод верхней оценки исходит из того, что мощность внешних сил  $W$  или энергия, вносимая инструментом в деформируемую заготовку, расходуется на преодоление внутренних сил  $W_i$ , определяемых сопротивлением пластической деформации заготовки, и сил трения  $W_{тр}$ :

$$W = W_i + W_{тр}. \quad (3)$$

При поступательном движении инструмента с постоянной скоростью  $V_0$  и силой деформирования  $P$  мощность внешних сил определяется как

$$W = PV_0. \quad (4)$$

Мощности внутренних сил и сил трения могут быть обусловлены полем скоростей в очаге деформации и определяться по уравнениям:

$$W_i = \int_v \tau_e S_e dV + \int_f \tau_s V_{i,j} df_{i,j}, \quad (5)$$

$$W_{тр} = \int_f \tau_{i,k} V_{i,k} df_{i,k}, \quad (6)$$

где  $\tau_e$  — интенсивности касательных напряжений;  $S_e$  — скорость деформации сдвига;  $V_{i,j}$  — скорость относительного перемещения на поверхностях  $f_{i,j}$  разрыва скорости внутри заготовки;  $V_{i,k}$  — скорость относительного перемещения на поверхности  $f_{i,k}$  инструмента;  $\tau_s$  — касательные напряжения на поверхностях  $f_{i,j}$ ;  $\tau_{i,k}$  — касательные напряжения на поверхностях  $f_{i,k}$ ; Для идеально жесткопластического материала без упрочнения можно принять:

$$\tau_e = \tau_s = 0.5\sigma_s = \text{const}. \quad (7)$$

Контактное же напряжение  $\tau_{i,k}$  приближенно можно определить через коэффициент пластического трения  $\mu_{i,k}$ , который изменяется в пределах 0 до 0.5:

$$\tau_{i,k} = 2 \mu_{i,k} \sigma_s. \quad (8)$$

Переходя к безразмерной удельной силе  $\frac{q}{\sigma_s}$ , отнесенной к площади инструмента  $f_u$ , получим следующее уравнение:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2f_u V_0} \left( \int_v S_e dV + \int_{f_{i,j}} V_{i,j} df_{i,j} + \int_{f_{i,k}} 2\mu_{i,k} V_{i,k} df_{i,k} \right). \quad (9)$$

Для полей скоростей из жестких блоков при условии, что деформация осуществляется за счет сдвигов между блоками, имеющими однородное поле скоростей, приведенное выше уравнение существенно упрощается. Так как на любой поверхности сдвигов  $f_{i,j}$  разность касательных составляющих  $V_{i,j}$  по всей поверхности  $f_{i,j}$  имеет постоянное значение, первый интеграл сокращается, а два других могут быть заменены на суммы:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2f_u V_0} \left( \sum_{i,j} f_{i,j} V_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} f_{i,k} V_{i,k} \right). \quad (10)$$

Суммирование в правой части уравнения должно быть произведено по всем поверхностям разрыва скорости.

В случае плоской деформации, когда длина заготовки  $L$  более чем в 5 раз больше ее ширины  $b$ , течение металла происходит только поперек оси, и ее длина не изменяется. Тогда при  $f_u = bL$ ,  $f_{i,j} = l_{i,j}L$ ,  $f_{i,k} = l_{i,k}L$  получим уравнение для плоской деформации:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2bV_0} \left( \sum_{i,j} l_{i,j} V_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} l_{i,k} V_{i,k} \right), \quad (11)$$

где  $l_{i,j}$ ,  $l_{i,k}$  — длина линий разрыва скорости между смежными блоками в плоскости деформации.

С целью упрощения дальнейшей работы с этим уравнением принимается обозначение

$$\left( \sum_{i,j} l_{i,j} V_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} l_{i,k} V_{i,k} \right) = A_v,$$

где  $A_v$  — скоростной коэффициент метода верхней оценки.

Таким образом, уравнение для плоской деформации принимает вид:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2bV_0} A_v. \quad (12)$$

Несмотря на то, что штамповка поковки типа стержня с полусферическим фланцем является типичной осесимметричной задачей, с некоторыми допущениями метод верхней оценки применим и для оценки потребной силы деформирования подобных ей поковок.

На рисунке 3 представлена схема разбиения очага пластической деформации окончательной стадии штамповки поковки типа стержня с полусферическим фланцем на семь жестких блоков.

В дальнейшем рассматривается правая половину осесимметричной заготовки. Скорость блока 1 равна скорости инструмента  $V_{0,1} = V_0$ .

Метод верхней оценки предполагает разделение скоростей на две группы: абсолютные скорости блоков  $V_{0i}$  и относительные скорости между смежными блоками  $V_{i,j}$ . Сначала из дографа скоростей, на основе подобия треугольников, можно найти скорости на границах смежных блоков (иногда их называют «разрывы скоростей»). Необходимо так же отметить, что нормальные компоненты скоростей на границах смежных блоков равны по модулю и направлению. В противном случае блоки «врезались бы или отставали друг от друга», и не выполнялось бы условие несжимаемости объема в скоростях.

Непосредственная оценка силы деформирования для поковки типа стержня с полусферическим фланцем осуществляется по уравнению:

$$P = \frac{1}{2V_0} A_v \sigma_s Lk, \quad (13)$$

где  $L$  — условная длина заготовки, принимаемая из условия равенства объема высаживаемой части реальной заготовки и условного объема рассматриваемой плоской заготовки ( $L = V_{\text{выс}} / S_{\text{полусферы}}$ );  $k = 4$  — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение силы деформирования при заполнении углов полусферы.

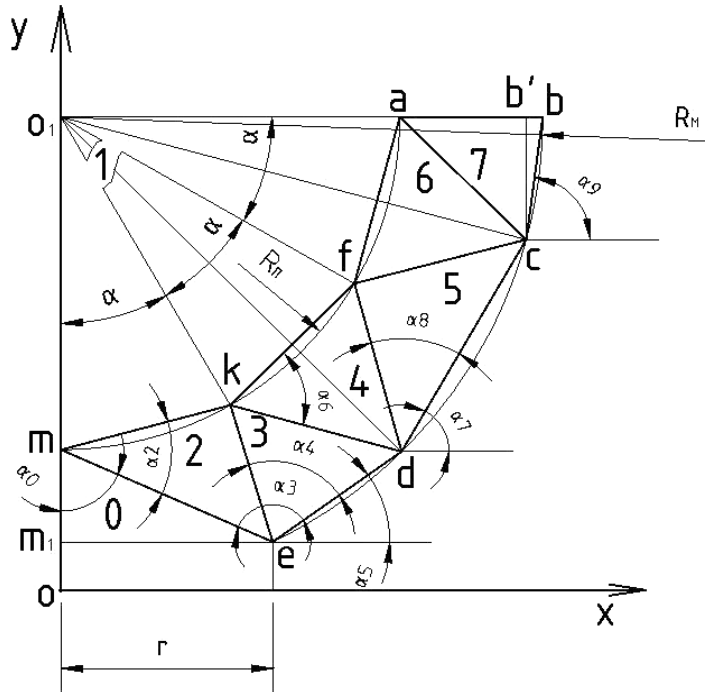


Рис. 3. Схема разбиения очага деформации на жесткие блоки

## Результаты моделирования

Апробация методики определения потребной силы деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем проводилась с исходными данными, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Исходные данные		Метод конечных элементов	Метод верхней оценки
Диаметр исходной заготовки, $d_0$ , мм		20	20
Напряжение течения материала, $\sigma_s$ , МПа (Сталь 45 при температуре 1100 С).		—	180
Коэффициенты реологической модели	$\sigma_0$ , МПа	91	—
	$A$	44	—
	$u$	0.33	—
	$z$	0.31	—
Размеры полусферы	Внутренний диаметр, $r$ , мм.	16	
	Внешний диаметр, $R$ , мм.	22.5	
Параметры трения	$\mu$	0.15	
	$t$	0.3	
$A_v$ (получен в результате построения годографа скоростей), мм <sup>2</sup> /с		—	88.863
$V_0$ , мм/сек		1	

В результате был получен график потребной силы деформирования с помощью программного комплекса DEFORM 2D, представленный на рисунке 4.

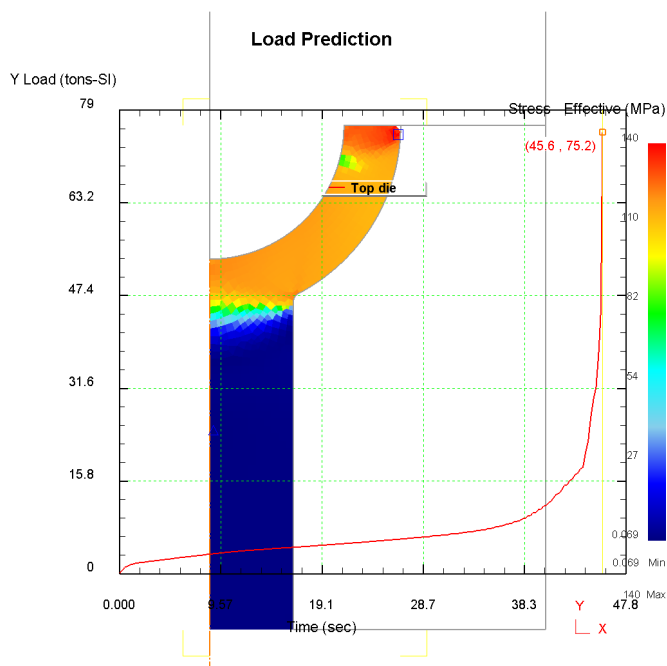


Рис. 4. График изменения потребной силы деформирования во времени, полученный в результате конечно-элементного моделирования

Метод верхней оценки не предполагает построение графика потребной силы деформирования по времени или перемещению в силу того, что рассматривает лишь конечную стадию деформирования, т. е. момент максимальной площади контакта инструмента и заготовки и максимальную силу деформирования. В данном примере потребная сила деформирования, рассчитанная методом верхней оценки, составляет 92 тонны (826 кН).

## Выводы

1. Описана методика определения потребной силы деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем.
2. Метод конечных элементов является более предпочтительным для решения подобных задач в силу того, что учитывает неравномерное накопление деформации в течение процесса и, как следствие, неравномерное напряжение течения во фланце.
3. Однако, в силу того, что метод верхней оценки не требует применения специальных дорогостоящих программных средств, его применения в подобных задачах так же может быть целесообразным.

## Список литературы

Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. / Ред. совет: Е. И. Семенов и др. — М.: Машиностроение, 1986. — Т. 2. Горячая штамповка. — 592 с.

Сидоров А. А. Определение волокнистого строения в поковках типа стержня с полусферическим фланцем // Заготовительное производство в машиностроении. — 2009. — № 5. С. 25–29.