



The methods of calculation of straining force at plastic shaping in tube slug with predictable size of surface of bridge from the tube wall to flange are given.

Л. А. ИСАЕВИЧ, М. И. СИДОРЕНКО, В. А. ГУРИНОВИЧ, БНТУ

УДК 621.77.001

## РАСЧЕТ УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ФЛАНЦА В ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКЕ

Пластическое формообразование относительно широких фланцев в трубных заготовках проводится в большинстве случаев посредством их отбортовки, являющейся завершающей стадией процесса раздачи концов этих заготовок жестким инструментом [1–4]. В результате такой операции конец трубной заготовки подвергается раздаче под прямым или близким к нему углом [4, 5].

При реализации процесса раздачи по данной схеме деформирующий пуансон должен содержать плавный переход от цилиндрической части к плоскости в виде торообразной поверхности, которая неизбежно копируется в раздаваемом участке заготовки (рис. 1, а). Однако в ряде случаев это не допускается чертежом готовой детали, например, при изготовлении корпуса водила бортовой передачи заднего моста автомобилей МАЗ.

Поэтому с целью исправления данного недостатка и обеспечения острой кромки в зоне перехода от цилиндрической полости трубы к фланцу толщину стенки заготовки выбирают заранее увеличенной. Затем за счет удаления избытка металла обработкой резанием достигают в детали наличия острой кромки в зоне перехода от цилиндрической полости к фланцу. Однако при таком подходе около 40% металла уходит в стружку, что естественно снижает коэффициент его использования, увеличивает трудоемкость изготовления и повышает себестоимость продукции.

Учитывая это, предложено после отбортовки по описанной выше схеме производить пластическое формоизменение торообразного участка заготовки за счет осадки ее цилиндрической части (рис. 1, б).

При этом полученную трубную заготовку с плоским фланцем, имеющим торообразный переход к цилиндрической полости, устанавливают в подпружиненную матрицу, а внутрь заготовки вводят ступенчатый пуансон без торообразного перехода от торца ступени к цилиндру.

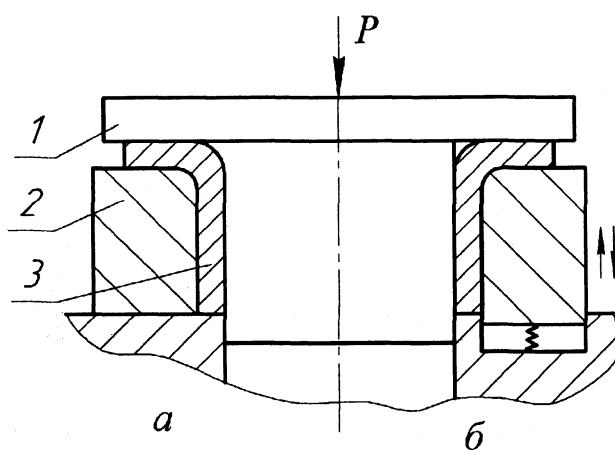


Рис. 1. Схема раздачи (а) и осадки (б) трубной заготовки: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка

При определении усилия, необходимого для формоизменения торообразного участка заготовки, процесс деформирования будем рассматривать как открытую прошивку фланца наружным диаметром  $D$  трубчатым прошивком, имеющим наружный диаметр  $d_1$ , внутренний –  $d_0$ .

Уравнение равновесия для этого случая запишется в виде [6]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{2\tau_k}{h} \quad (1)$$

Здесь касательные напряжения на границе раздела осаживаемой части 1 (рис. 2) высотой  $h$  трубной заготовки, охваченной фланцем, и недеформируемого участка 2 трубы, заключенного между цилиндрической частью пуансона и матрицей, принимаем максимальными  $\tau_k = \tau_{\max} = 0,5\sigma_T$ . Поэтому для решения дифференциального уравнения (1) возникает необходимость принять такой же величины касательные напряжения и на поверхности контакта заготовки с торцом ступенчатого пуансона.

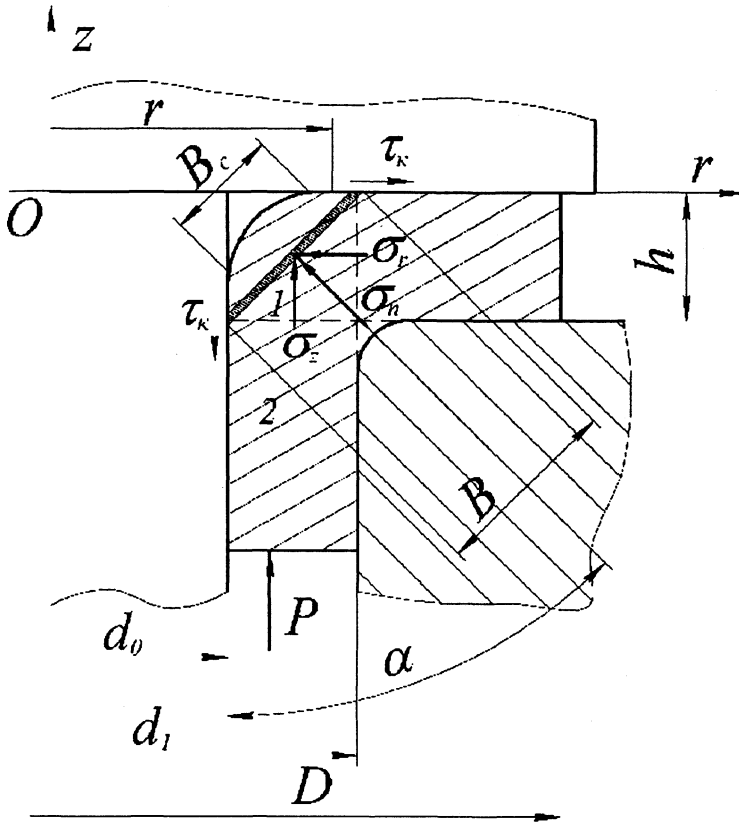


Рис. 2. Схема очага деформации при формоизменении торообразного участка

Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{\sigma_r}{h},$$

а после разделения переменных и проведения интегрирования

$$\sigma_r = -\sigma_\tau \frac{r}{h} + c. \quad (2)$$

Постоянную интегрирования определим из граничных условий, согласно которым при  $r = \frac{d_1}{2}$

в соответствии с [6]  $\sigma_r = 1,1\sigma_\tau \ln \frac{D}{d_1}$ . Тогда

$c = \sigma_\tau \left( 1,1 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1}{2h} \right)$ . Подставив значение этой постоянной в выражение (2), получим

$$\sigma_r = \sigma_\tau \left( 1,1 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{0,5d_1 - r}{h} \right). \quad (3)$$

Уравнение пластичности для данного случая запишем в виде [6]

$$\sigma_z - \sigma_r = \sigma_\tau, \quad (4)$$

поскольку будем полагать, что радиальные и

тангенциальные напряжения в очаге деформации близки по своим значениям. Используя это условие, на основании уравнения (3) нетрудно записать выражение для определения осевого напряжения:

$$\sigma_z = \sigma_\tau \left( 1 + 1,1 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{0,5d_1 - r}{h} \right). \quad (5)$$

Радиальные (3) и осевые (5) напряжения могут вызвать пластическое формоизменение торообразного участка фланцевой части трубы. Такое формоизменение в свою очередь обусловлено действием нормального напряжения в площадке, равнонаклоненной к осям координат  $roz$  (рис. 2), которое согласно [6]:

$$\sigma_n = \sigma_r a_r + \sigma_z a_z. \quad (6)$$

Но поскольку в нашем случае  $a_r = a_z = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , то в соответствии с (6) запишем:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sigma_r + \sigma_z). \quad (7)$$

Подставив в выражение (7) значения  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$  соответственно из (3) и (5), получим:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_\tau \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - 2r}{h} \right). \quad (8)$$

Анализируя последнее выражение, нетрудно заметить, что значение  $\sigma_n$  зависит от переменной  $r$ , которая изменяется в пределах  $\frac{d_0}{2} \leq r \leq \frac{d_1}{2}$ . При  $r = \frac{d_1}{2}$  величина  $\sigma_n$  будет минимальной, а при  $r = \frac{d_0}{2}$  она станет максимальной. Учитывая это, очевидно, справедливо будет воспользоваться некоторым средним значением  $\sigma_n$ , т.е., отвечающим значению переменной  $2r = \frac{1}{2}(d_1 + d_0)$ . Тогда уравнение (8) примет вид

$$\sigma_{n\phi} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_\tau \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right). \quad (9)$$

Для определения величины пластического формоизменения торообразного участка заготовки воспользуемся известным [7] решением о заполнении металлом углубления в деформирующем инструменте, приведенным для случая плоской деформации. В наших обозначениях (рис. 2) его можно записать в виде

$$\sigma_{n\phi} = \beta \sigma_\tau \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^\delta - 1 \right]. \quad (10)$$

Здесь  $\delta = \frac{f}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{f}{\operatorname{tg}45^\circ} = f$  ( $f$  – коэффициент контактного трения). Параметр Лоде в нашем случае можно принять  $\beta \approx 1$ , а в соответствии с рис. 2 величина  $B = h/\sin 45^\circ = \sqrt{2} h$ .

Тогда уравнению (10) примет вид

$$\sigma_{n_y} = \sigma_\tau \left( 1 + \frac{1}{f} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^f - 1 \right]. \quad (11)$$

Теперь будем полагать, что  $\sigma_{n_y} = \sigma_{n_{cp}}$ , т.е. примем равенство между (9) и (11):

$$1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} = \sqrt{2} \left( 1 + \frac{1}{f} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^f - 1 \right]. \quad (12)$$

Искомой величиной в данном случае является  $B_c$  – ширина площадки свободной поверхности. В связи с этим выражение (12) вначале приведем к виду

$$1 + \frac{f \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right)}{\sqrt{2}(f+1)} = \left( \frac{B}{B_c} \right)^f,$$

и далее запишем

$$B_c = \frac{B}{\left[ 1 + \frac{f \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right)}{\sqrt{2}(f+1)} \right]^{\frac{1}{f}}}. \quad (13)$$

По полученной формуле произведен расчет параметра  $B_c$  для разных коэффициентов контактного трения при формообразовании фланца внешним диаметром  $D = 375$  мм из трубы, имеющей наружный диаметр  $d_1 = 294$  мм и внутренний  $d_0 = 270$  мм. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Как видно из рисунка, с уменьшением коэффициента контактного трения протяженность свободной поверхности  $B_c$  в зоне перехода от полости трубы к фланцу снижается. Однако этого недостаточно, чтобы удовлетворить условию чертежа, согласно которому величина не должна превышать  $2\sqrt{2}$  мм, что соответствует фаске в зоне перехода от цилиндрического отверстия к фланцу, равной  $2 \times 45^\circ$ . Поэтому требуется совершенствование данного процесса отбортовки.

С этой целью предложено ввести упорный буртик в матрице для ограничения радиального

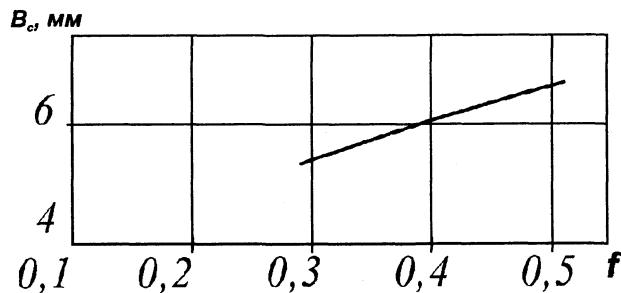


Рис. 3. Зависимость величины  $B_c$  от коэффициента контактного трения  $f$

течения фланца от центра к периферии (рис. 4). Это позволит направить течение металла в заполнение полости, образованной заготовкой, цилиндрической частью пуансона и его торцом.

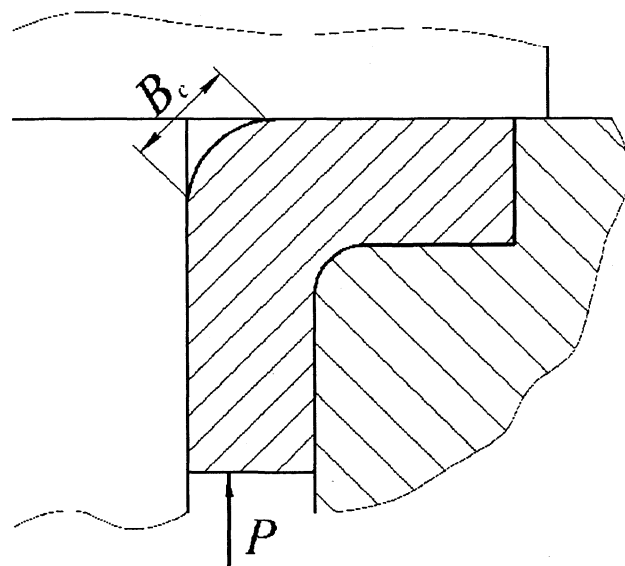


Рис. 4. Конструкция матрицы с ограничением радиального течения фланца

Теперь для нового значения  $B_c$  из уравнения (12) определим, на сколько необходимо увеличить его левую часть:

$$x + 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} = \sqrt{2} \left( 1 + \frac{1}{f} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^f - 1 \right].$$

Отсюда

$$x = \sqrt{2} \left( 1 + \frac{1}{f} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^f - 1 \right] - 1 - 2,2 \ln \frac{D}{d_1} - \frac{d_1 - d_0}{2h}. \quad (14)$$

По формуле (14) рассчитаем значения величины  $x$  для разных коэффициентов контактного трения в случае формообразования фланца из трубы с ранее заданными параметрами. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость параметра  $x$  от коэффициента контактного трения

$f$	0,5	0,4	0,3
$x$	3,6	2,4	1,8

Далее введем параметр  $x$  в уравнение (9), которое примет вид:

$$\sigma_{n_{cp}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_{\tau} \left( 1 + x + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right). \quad (15)$$

Таблица 2. Зависимость  $\sigma_{n_{cp}}$  от коэффициента контактного трения

$f$	0,5	0,4	0,3
$\frac{\sigma_{n_{cp}}}{\sigma_{\tau}}$	4,34	3,49	3,06

Как видно из табл. 2, с уменьшением коэффициента контактного трения снижается и значение  $\sigma_{n_{cp}}$ .

Согласно формуле (7), можно записать:

$$\sigma_{n_{cp}} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sigma_z + \sigma_r).$$

Отсюда получим:

$$\sigma_z = \sqrt{2} \sigma_{n_{cp}} - \sigma_r.$$

Решая данное уравнение совместно с условием пластичности (4), определяем

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_{n_{cp}} + \frac{1}{2} \sigma_{\tau}, \quad (16)$$

а далее из уравнения пластичности (4) найдем

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_{n_{cp}} - \frac{1}{2} \sigma_{\tau}. \quad (17)$$

На рис. 5 показано изменение величины осевого напряжения  $\sigma_z$  в зависимости от коэффициента контактного трения для случая формоизменения зоны перехода от стенки трубы к фланцу до величины  $B_c = 2\sqrt{2}$  мм.

Далее решим совместно уравнения (15) и (16) относительно  $\sigma_z$ . Тогда можно записать

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \sigma_{\tau} \left( 2 + x + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right). \quad (18)$$

По уравнению (18) рассчитаем значения осевого напряжения  $\sigma_z$  в зависимости от коэффициента контактного трения для случая формоизменения зоны перехода от стенки трубы к фланцу до величины  $B_c = 2\sqrt{2}$  мм. По полученным значениям построим график, показанный на рис. 5.

Как видно из рисунка, с уменьшением коэффициента контактного трения снижается и величина осевого напряжения  $\sigma_z$ .

Для определения усилия деформирования при пластическом формоизменении торообразного участка в заготовке будем считать распределение осевого напряжения по толщине стенки ее трубной части, близким к равномерному. Тогда усилие деформирования можно представить как

По полученному уравнению рассчитаем значения  $\sigma_{n_{cp}}$  в зависимости от переменной  $x$  для различных коэффициентов контактного трения. Результаты расчета приведены в табл. 2.

$$P = \sigma_z \pi \frac{d_1^2 - d_0^2}{4}. \quad (19)$$

Вместе с тем, учитывая, что данный процесс мы рассматриваем как открытую прошивку фланца трубчатой заготовкой с наружным диаметром  $d_1$ , то фланец и сама заготовка являются как бы разделенными по цилиндрической поверхности диаметром  $d_1$ . Поэтому дополнительно следует учесть усилие, расходуемое на сдвиг металла, возникающий на этой поверхности. Это можно записать в виде

$$P_c = \frac{1}{2} \sigma_{\tau} \pi d_1 h. \quad (20)$$

Тогда общее усилие деформирования будет

$$P_0 = P + P_c.$$

Подставив сюда значения составляющих  $P$  и  $P_c$  соответственно из выражений (19) и (20), с учетом уравнения (18) окончательно запишем

$$P_0 = \frac{1}{2} \pi \sigma_{\tau} \times \left[ \frac{d_1^2 - d_0^2}{4} \left( 2 + x + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right) + d_1 h \right]. \quad (21)$$

В соответствии с полученным выражением на рис. 6 показано изменение усилия формоизменения в зависимости от коэффициента трения при деформировании трубной заготовки с ранее заданными параметрами из стали 30 при температуре 900 °С.

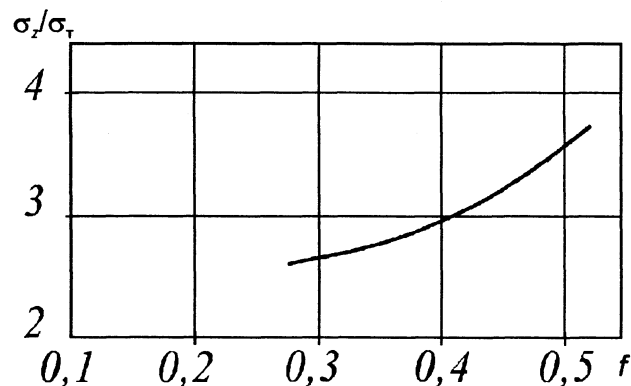


Рис. 5. Зависимость относительных значений осевого напряжения от коэффициента контактного трения

$P, \text{кН}$

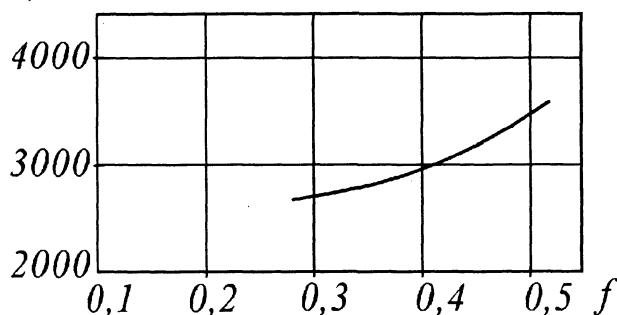


Рис. 6. Зависимость усилия деформирования фланца заготовки от коэффициента контактного трения

Предел текучести для этой стали при заданной температуре, согласно [8], составляет 80 МПа.

Согласно [9], коэффициент контактного трения для стали, деформируемой при температуре 900 °С, колеблется в пределах 0,35–0,45. Из этого можно сделать вывод, что в нашем случае он будет близок к 0,4 и, следовательно, усилие, необходимое для формообразования фланца с зоной перехода от стенки заготовки к фланцу, равной  $2\sqrt{2}$  мм, будет около 2966 кН.

Таким образом, для осуществления данной технологической операции вполне подходит пресс с номинальным усилием 4000 кН.

## Выводы

Предложенная методика расчета усилия деформирования при пластическом формообразовании фланца в трубной заготовке с заранее заданной величиной поверхности перехода от стенки трубы к фланцу позволяет выбрать пресс соответствующего номинального усилия.

## Литература

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980.
3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968.
4. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990.
5. Особенности формообразования пластическим деформированием фланца в трубной заготовке/ Л.А. Исаевич, А.В. Мазуренок, А.В. Шиманский, М.И. Сидоренко// *Металлургия*. Мн.: Наука и техника, 2005. Вып. 29. С. 157–164.
6. Сторожев М.В., Попов Е.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977.
7. Способ повышения усталостной прочности и долговечности малолистовых рессор/ Л.А. Исаевич, Д.М. Иваницкий // *Металлургия*. Мн.: Наука и техника. 2005. Вып. 29. С. 148–157.
8. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: *Металлургия*, 1973.
9. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. М.: *Металлургия*, 1973.



## Выставки, съезды, конференции, семинары

23-26.10.2007

"Машиностроение. Металлургия. Металлообработка-2007". Международная специализированная выставка, г. Ижевск (Россия). Реквизиты организаторов: т.: +7 (3412) 25-48-68, 25-47-33, 25-48-74; <http://www.neft.vcudmurtia.ru>.

31.10-02.11.2007

"Металлургия. Машиностроение-2007". 6-я специализированная выставка-конференция. Екатеринбург, Центр Международной торговли, ул. Куйбышева, 44. Организатор: Уралэкспоцентр.

4-6.12.2007

3-й Литейный консилиум. (Формат: дискуссионные круглые столы) на тему: "Литейная форма" (Решение проблем формообразования при производстве отливок из черных сплавов). Место проведения: г. Миасс, санаторий "Жемчужина Урала". Постоянный адрес оргкомитета ЛК: 454901, Россия, г. Челябинск, ул. Водрем-40, стр. 25. Подробная информация по ссылке <http://npp.ru/consult/nextconsilium/>.