

УДК 621.77.001

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОТБОРТОВКИ ФЛАНЦА В ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКЕ С ЕЕ ЛОКАЛЬНЫМ НАГРЕВОМ

Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВИЧ Л. А., канд. техн. наук, доц. СИДОРЕНКО М. И.,  
инженеры ШИМАНСКИЙ А. В., СИДОРЕНКО А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Формообразование пластическим деформированием относительно широких фланцев (при отношении ширины фланца к начальной толщине стенки трубы больше 2,2) в трубных заготовках в большинстве случаев осуществляется посредством их отбортовки, являющейся завершающей стадией процесса раздачи концов этих заготовок жестким инструментом [1–3]. В результате такой операции конец трубной заготовки подвергается раздаче под прямым или близким к нему углом [3, 4]. Для ее осуществления деформирующий пуансон должен содержать плавный переход от цилиндрической части к плоскости в виде торообразной поверхности, которая копируется в раздаваемом участке заготовки (рис. 1). При этом с целью повышения пластичности металла в зоне формообразования фланца и снижения опасности его разрушения прибегают к локальному нагреву отбортовываемой части заготовки.

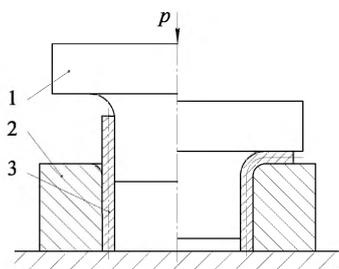


Рис. 1. Схема раздачи с отбортовкой трубной заготовки: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка

Для установления картины пластического формоизменения конца трубной заготовки обратимся к рис. 2. На начальной стадии внедрения пуансона в полость заготовки происходит раздача ее конца, что можно с некоторым при-

ближением представить как изгиб стенки заготовки [1]. Величина изгибающего момента, действующего в меридиональном сечении, зависит от величины меридиональных нормальных напряжений  $\sigma_p$  и уменьшается с увеличением абсолютного значения последних. Однако, как показано [1], даже при значительных, в условиях формоизменяющих операций листовой штамповки, меридиональных напряжениях величина изгибающего момента уменьшается незначительно по сравнению с моментом, возникающим при чисто пластическом изгибе полосы без упрочнения (в нашем случае упрочнение отсутствует).

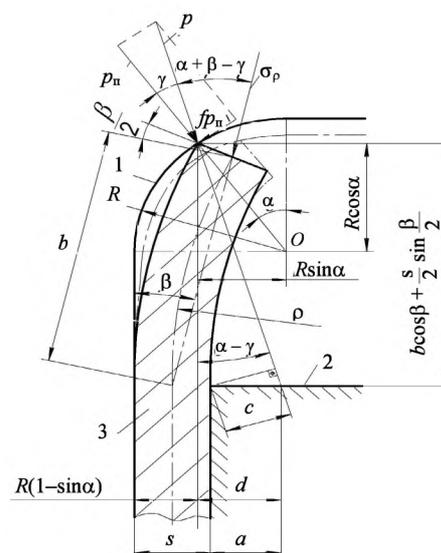


Рис. 2. Схема действующих сил на начальном этапе раздачи конца трубной заготовки

Из сказанного следует, что в первом приближении величина изгибающего момента, дейст-

вующего в месте резкого изменения кривизны и приходящегося на единицу длины, измеренной вдоль окружной координаты трубной заготовки, может быть приближенно определена по формуле

$$M = \frac{\sigma_T s^2}{4}, \quad (1)$$

где  $s$  – толщина стенки трубной заготовки;  $\sigma_T$  – предел текучести материала трубы.

Согласно рис. 2 величина этого момента, также приходящегося на единицу длины, измеренной вдоль окружной координаты кольцеобразного сечения трубы, может быть представлена следующим образом:

$$M = pc, \quad (2)$$

где  $p$  – результирующая составляющая нормального усилия, приходящегося на единицу окружной длины кольцеобразного сечения трубы;  $c$  – расстояние от точки перегиба (кромки матрицы) до линии действия результирующей единичной силы  $p$ .

После совместного решения (1) и (2) можно записать

$$p = \frac{\sigma_T s^2}{4c}. \quad (3)$$

В соответствии с рис. 2 величину меридионального напряжения (в нашем случае действующее в направлении хорды дуги радиусом  $\rho$ ) можно представить как

$$\sigma_p = \frac{p \cos(\alpha - \gamma + \beta)}{s}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол контакта края заготовки с контуром пуансона.

Решив совместно (3) и (4), получим

$$\sigma_p = \frac{\sigma_T s \cos(\alpha - \gamma + \beta)}{4c} \leq \sigma_T. \quad (5)$$

При этом должно непременно соблюдаться условие  $\sigma_p \leq \sigma_T$ , поскольку в противном случае задача не имеет физического обоснования.

Входящие сюда величины углов  $\gamma$  и  $\beta$  можно представить как:  $\gamma = \arctg f$ ;  $\beta =$

$= \arcsin \frac{R(1 - \sin \alpha)}{b}$ , где  $f$  – коэффициент контактного трения заготовки о стенки пуансона.

С учетом введенного ограничения  $\sigma_p \leq \sigma_T$  входящая в выражение (5) величина  $\beta$  примет скорректированное значение  $\beta_1$ .

Для определения радиуса кривизны раздаваемого участка заготовки воспользуемся известным [1] уравнением, которое в наших обозначениях запишется как  $\rho = \frac{\sigma_T s}{4\sigma_p(1 - \cos \beta)}$ .

Подставив величину  $\sigma_p$  из выражения (4), получим

$$\rho = \frac{c}{\cos(\alpha - \gamma + \beta)(1 - \cos \beta)}. \quad (6)$$

Из рис. 2 следует, что  $a + s = d + R(1 - \sin \alpha)$ .

В свою очередь  $\frac{d}{b \cos \beta + \frac{s}{2} \sin \frac{\beta}{2}} = \operatorname{tg}(\alpha - \gamma)$

или после преобразований  $d = \left( b \cos \beta + \frac{s}{2} \sin \frac{\beta}{2} \right) \times \operatorname{tg}(\alpha - \gamma)$ . Поскольку второе слагаемое в скобках на порядок меньше первого, им можно пренебречь, и тогда последнее выражение примет вид  $d = b \cos \beta \operatorname{tg}(\alpha - \gamma)$ .

С учетом этого и соответствующих преобразований запишем

$$a = b \cos \beta \operatorname{tg}(\alpha - \gamma) + R(1 - \sin \alpha) - s.$$

Далее в соответствии с рис. 2 величина  $c = a \cos(\alpha - \gamma)$ , а с учетом предыдущего выражения ее можно представить как

$$c = [b \cos \beta \operatorname{tg}(\alpha - \gamma) + R(1 - \sin \alpha) - s] \cos(\alpha - \gamma). \quad (7)$$

Под воздействием единичной силы  $p$  происходит смятие острой кромки деформируемого участка трубы (рис. 2). Условие этого смятия можно в первом приближении записать как  $p = l \sigma_T$ , где  $l$  – длина площадки смятия, копируемой контуром пуансона. Отсюда легко найти

$$l = \frac{p}{\sigma_T}. \quad (8)$$

Величину  $p$  из (4) представим как  $p = \frac{\sigma_p s}{\cos(\alpha - \gamma + \beta)}$  и далее с учетом (8) запишем

$$l = \frac{\sigma_p s}{\sigma_T \cos(\alpha - \gamma + \beta)}. \quad (9)$$

Здесь также следует ввести ограничение  $\sigma_p \leq \sigma_T$ .

В табл. 1 приведены результаты расчета параметров отбортовки конца длиной 50 мм трубной заготовки наружным диаметром  $D = 286$  мм с толщиной стенки  $s = 16$  мм для разных коэффициентов контактного трения при радиусе торообразной переходной поверхности  $R = 23$  мм.

Таблица 1

Расчетные значения параметров отбортовки фланца в трубной заготовке

$\alpha$ , град.	$\gamma$ , град.	$\beta$ , град.	$\beta_1$ , град.	$c$ , мм	$\sigma_p/\sigma_T$	$\rho$ , мм	$b\cos\beta$ , мм	$l$ , мм
$f = 0,2$								
30	11,4	13,0		11,35	0,290	530,0	48,7	5,6
25	«»	15,5		8,60	0,406	274,0	48,2	7,4
20	«»	17,5		6,20	0,580	150,0	47,7	9,6
15	«»	20,0		4,02	0,916	71,6	47,0	16,0
10	«»	22,4	22,2	1,78	2,100	25,7	46,2	17,1
7	«»	23,0	23,8	0,67	5,63	8,3	46,0	17,0
5	«»	24,8	25,4	-0,31	12,20	3,4	45,4	16,8
0	«»	27,5	30,8	-0,82	4,680	7,7	44,3	16,7
$f = 0,3$								
30	17	13,0		6,60	0,545	285,0	48,7	9,7
25	«»	15,5		4,00	0,918	121,0	48,2	16,0
20	«»	17,5	20,0	1,60	2,300	28,8	47,7	17,0
17	«»	20,9	24,9	-1,45	2,64	16,4	46,5	16,7
15	«»	20,0	20,2	-0,64	5,94	11,2	47,0	16,8
10	«»	22,4	27,8	-2,67	1,40	24,7	46,2	16,6
5	«»	24,8		-4,62	0,85	51,2	45,4	11,6
0	«»	27,5		-6,20	0,634	55,8	44,3	10,4
$f = 0,4$								
30	22	13,0	13,4	1,54	2,42	61,5	48,7	17,1
26	«»	15,0	15,2	-0,296	12,78	9,2	48,4	16,9
25	«»	15,5	17,9	-0,23	18,10	4,2	48,2	16,7
20	«»	17,5	17,6	-0,85	4,53	18,7	47,7	16,6
15	«»	20,0		-4,77	0,79	76,7	47,0	14,8
10	«»	22,4		-6,6	0,61	90,6	46,2	10,8
5	«»	24,8		-8,4	0,47	91,2	45,4	8,8
0	«»	27,5		-10,1	0,39	94,3	44,3	6,3

Следует отметить, что параметры  $\sigma_p$ ,  $\rho$  и  $c$  рассчитаны с помощью уравнений (5)–(7) соответственно.

Анализ полученных данных показывает, что в случае, когда используется коэффициент контактного трения  $f = 0,2$ , полное прилегание стенки заготовки к криволинейному контуру пуансона начинается (рис. 3) лишь при угле  $\alpha$  контакта заготовки с этим контуром, равном примерно  $7^\circ$ . С ростом коэффициента контактного трения это наступает раньше. Так, при коэффициенте контактного трения  $f = 0,3$  этот угол составляет около  $\alpha = 15^\circ$ , а для  $f = 0,4$  он достигает порядка  $\alpha = 26^\circ$ .

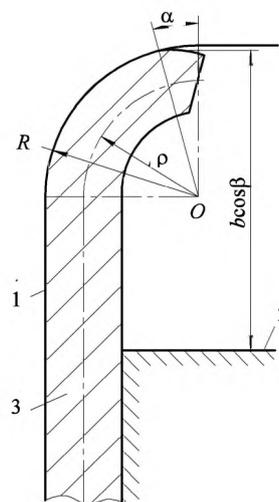


Рис. 3. Схема копирования заготовкой контура пуансона за счет локальной потери ее устойчивости

Из сказанного можно сделать вывод о том, что с увеличением коэффициента контактного трения потеря устойчивости деформируемого конца заготовки с прилеганием к контуру пуансона наступает при меньшем значении коэффициента раздачи.

Как было отмечено ранее, в начальный момент раздачи происходит смятие внутренней кромки деформируемого конца заготовки (рис. 2) при условии (9). В результате формоизменяется краевая часть заготовки. Параметры формоизменения можно оценить в соответствии с рис. 4 и условием постоянства объема [5], согласно которому протяженность площадки смятия от силового воздействия профиля пуансона  $l = 2R\varphi$ , где  $\varphi$  – центральный угол на криволинейном участке пуансона.

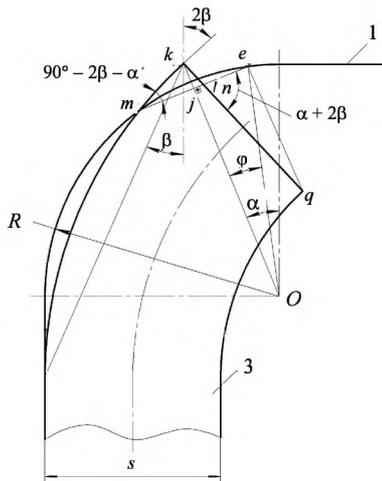


Рис. 4. Схема для определения геометрических параметров формоизменения кромки трубной заготовки при ее раздаче

Откуда

$$\varphi = \frac{l}{2R}. \quad (10)$$

Тогда длина хорды  $me = 2R \sin \varphi$ , а с учетом (10) запишем

$$me = 2R \sin \frac{l}{2R}. \quad (11)$$

В свою очередь длина половины хорды  $mj = R \sin \frac{l}{2R}$ . Далее из треугольника  $mkj$  найдем отрезок

$$mk = \frac{R \sin(l/2R)}{\cos(90^\circ - 2\beta - \alpha)}. \quad (12)$$

Затем, рассматривая треугольник  $mkn$ , находим длину отрезка

$$nk = \frac{R \sin(l/2R) \operatorname{tg}(90^\circ - 2\beta - \alpha)}{\cos(90^\circ - 2\beta - \alpha)}. \quad (13)$$

Зная эту величину, нетрудно определить длину  $nq$  стороны треугольника  $neq$  как

$$nq = s - \frac{R \sin(l/2R) \operatorname{tg}(90^\circ - 2\beta - \alpha)}{\cos(90^\circ - 2\beta - \alpha)}. \quad (14)$$

Из треугольника  $mkn$  можно найти длину стороны

$$mn = \frac{R \sin(l/2R)}{\cos^2(90^\circ - 2\beta - \alpha)}. \quad (15)$$

Вычитая эту величину из длины отрезка  $me$ , определяем сторону  $ne$  треугольника  $neq$

$$ne = 2R \sin \frac{l}{2R} - \frac{R \sin(l/2R)}{\cos^2(90^\circ - 2\beta - \alpha)}. \quad (16)$$

Затем по известным сторонам  $nq$ ,  $ne$  и углу между ними  $\alpha + 2\beta$  из этого же треугольника находим сторону

$$eq = \sqrt{nq^2 + ne^2 - 2nqne \cos(\alpha + 2\beta)}, \quad (17)$$

которая определяет толщину краевой части стенки трубной заготовки после раздачи.

На основе расчетных величин  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $l$ , взятых из табл. 1, и заданных геометрических параметров  $R$  и  $s$  построены графические зависимости толщины  $eq = s_k$  краевой части заготовки от угла  $\alpha$  ее контакта с контуром пуансона для разных коэффициентов контактного трения, которые представлены на рис. 5.

Согласно (4), (9), (14), (16), (17) и рис. 4 в начале процесса раздачи, когда  $\alpha = 90^\circ$ , усилие раздачи равно нулю и толщина краевой части стенки заготовки  $s_k = s$  – начальной толщине этой стенки. Поэтому все кривые начинаются из одной точки.

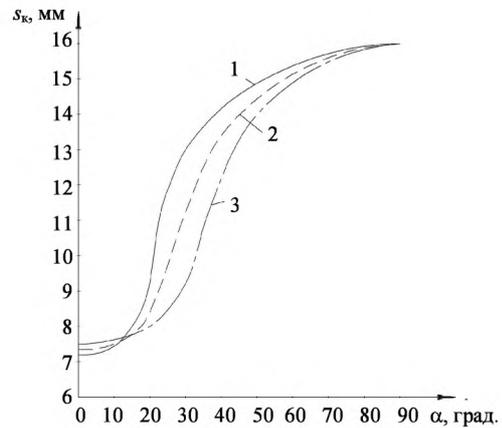


Рис. 5. Зависимости толщины  $s_k$  краевой части стенки заготовки при ее раздаче от угла контакта с пуансоном для разных коэффициентов контактного трения: 1 –  $f = 0,2$ ; 2 –  $0,3$ ; 3 –  $0,4$

Анализ графиков показывает, что конечная толщина края стенки заготовки в результате смятия ее кромки в процессе раздачи несколько возрастает с увеличением коэффициента контактного трения. Это объясняется тем, что при

больших значениях этого коэффициента раньше наступает потеря устойчивости стенки заготовки с полным прилеганием ее к контуру пуансона, что приводит к увеличению площади контактируемых поверхностей и уменьшению смятия кромки. С ростом коэффициента контактного трения происходит более интенсивное смятие кромки заготовки на начальных этапах раздачи. Поэтому кривая 3 в этом диапазоне процесса раздачи располагается ниже кривой 1.

### **ВЫВОД**

Таким образом, раздача трубных заготовок с последующей отбортовкой фланца всегда сопровождается утонением стенки заготовки в зоне деформации не только за счет увеличе-

ния диаметра ее краевой части, но и вследствие смятия внутренней кромки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
2. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве легательных аппаратов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1970. – 351 с.
4. Ершов, В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
5. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

Поступила 11.01.2010

УДК 621.923

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕРЫВИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Докт. техн. наук, проф. АКУЛОВИЧ Л. М., канд. техн. наук, доц. СЕРГЕЕВ Л. Е.,  
инж. КОРЗУН А. Е., канд. техн. наук БАБИЧ В. Е.*

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
НПО «Интеграл»*

На формирование шероховатости поверхностей деталей машин и их физико-механических свойств большое влияние оказывают процессы финишной обработки. К числу таких процессов относится магнитно-абразивная обработка (МАО), основанная на использовании энергии электромагнитного поля (ЭМП) в рабочем зазоре между поверхностью полусного наконечника электромагнита и обрабатываемой поверхностью [1, 2].

Известно, что любая финишная абразивная обработка прерывистых поверхностей заготовок деталей имеет более высокий уровень трудозатрат по сравнению с обработкой непрерывных поверхностей. Это обусловлено тем, что для абразивного инструмента с жестко связан-

ном зерном обязательным условием является профилирование режущего контура адекватно обрабатываемой поверхности. В отличие от инструментов с жестко связанным абразивным зерном при МАО ферроабразивная «щетка» обладает возможностью частичного огибания контура обрабатываемой поверхности. Для процесса МАО прерывистых поверхностей одной из главных задач является обеспечить необходимое распределение магнитного потока, который всегда стремится протекать по энергетически выгодному (с наибольшей магнитной проницаемостью) участку магнитной цепи. Для прерывистых поверхностей таким участком является ферромагнитный материал его зуба, а не воздушный промежуток межзубной впади-