УДК 621.77.001

РАСЧЕТ УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ОТБОРТОВАННОГО ФЛАНЦА В ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКЕ

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

Белорусский национальный технический университет

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].

Для осуществления процесса раздачи по данной схеме в деформирующем инструменте необходимо иметь плавный переход от цилиндрической части к плоскости в виде торообразной поверхности (рис. 1а). Такая поверхность, естественно, копируется и в раздаваемой части заготовки, что в ряде случаев не допускается конструкцией получаемой детали.

С целью исправления указанного недостатка и обеспечения острой кромки между цилиндрическим отверстием и фланцевой частью толщину стенки заготовки заранее выбирают увеличенной. После этого за счет удаления избытка металла обработкой резанием получают деталь с острой кромкой в зоне перехода от фланца к цилиндрической полости заготовки. Однако при этом около 40 % металла уходит в стружку, что существенно снижает коэффициент его использования и приводит к повышению себестоимости изготовления деталей.

В связи с этим предложено техническое решение, суть которого сводится к тому, что после отбортовки по описанной выше схеме производят пластическое формоизменение торообразного участка заготовки за счет осадки ее цилиндрической части (рис. 1б).

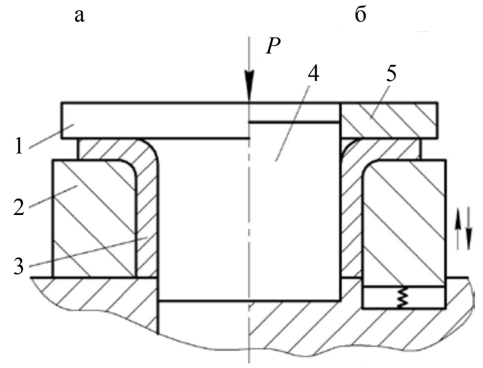

Рис. 1. Схемы: а – раздачи; б – осадки трубной заготовки; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – цилиндрический стержень; 5 – пресс-шайба

Полученную трубную заготовку с фланцем, перпендикулярным ее оси и имеющим торообразный переход к цилиндрической полости, устанавливают в подпружиненную матрицу, а внутрь заготовки вводят пуансон без торообразного перехода от торца ступени к цилиндру, состоящий из неподвижного цилиндрического стержня и подвижной пресс-шайбы.

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

Уравнение равновесия для этого случая запишется в виде [6]

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

Здесь касательные напряжения на границе раздела осаживаемой части 1 (рис. 2) высотой h трубной заготовки, охваченной фланцем, и недеформируемого участка 2 трубы, заключенного между цилиндрическим стержнем и матрицей, принимаем максимальными $\tau_к = \tau_{max} = 0{,}5\sigma_т$. Поэтому для решения дифференциального уравнения (1) возникает необходимость принять такой же величины касательные напряжения и на поверхности контакта заготовки с пресс-шайбой.

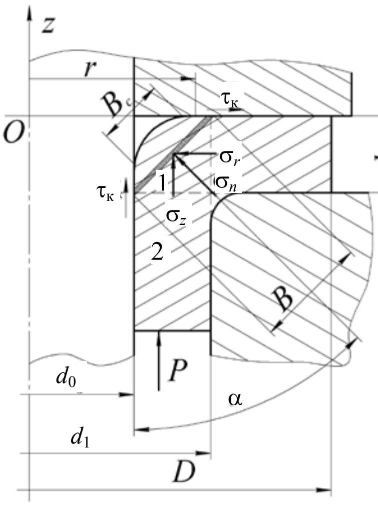

Рис. 2. Схема очага деформации при формоизменении торообразного участка

Тогда уравнение (1) примет вид

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

а после разделения переменных и проведения интегрирования

$$\sigma_r = -\sigma_т \frac{r}{h} + c. \qquad (2)$$

Постоянную интегрирования определим из граничных условий, согласно которым при $r = \frac{d_1}{2}$ в соответствии с [6] $\sigma_r = 1{,}1\sigma_т \ln\frac{D}{d_1}$. Тогда $c = \sigma_т\left(1{,}1\ln\frac{D}{d_1} + \frac{d_1}{2h}\right)$. Подставив значение этой постоянной в выражение (2), получим

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

Уравнение пластичности для данного случая имеет вид [6]

$$\sigma_z - \sigma_r = \sigma_т, \qquad (4)$$

так как полагаем, что радиальные и тангенциальные напряжения в очаге деформации близки по своим значениям. Используя это условие, на основании уравнения (3) можно записать выражение для определения осевого напряжения

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

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) [6]:

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

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

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

Подставив в (7) значения σ_r и σ_z соответственно из выражений (3) и (5), получим

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

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

$$\sigma_{n_\text{ф}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_\text{т}\left(1 + 2,2\ln\frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h}\right). \quad (9)$$

Для определения величины пластического формоизменения торообразного участка заготовки рассмотрим задачу о заполнении металлом углубления в деформирующем инструменте [7]. Выделим в очаге деформации элемент толщиной dn, выполненный в виде оболочки усеченного конуса (рис. 3).

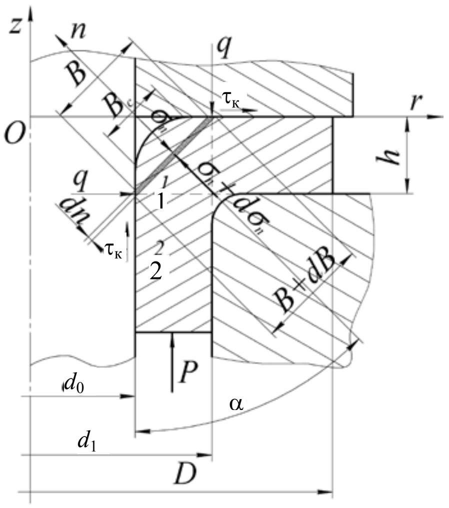

Рис. 3. Схема очага деформации при угловом смещении участка заготовки

Уравнение равновесия для единичной длины (в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа) этого элемента запишем в виде

$$\left(\sigma_n + d\sigma_n\right)\left(B + dB\right) - \sigma_n B - 2q\frac{dn}{\cos\alpha}\sin\alpha = 0, \quad (10)$$

где σ_n – напряжение, действующее в направлении оси n, повернутой относительно оси Oz на угол α = 45°; B – ширина выделенного элементарного сечения; q – нормальное напряжение, действующее на контакте между деформирующим инструментом и металлом в элементарном сечении.

В уравнении равновесия (10) не учитываются силы контактного трения, так как благодаря подвижной центральной части пуансона эти силы по отношению к выделенному элементу нейтрализуются из-за разной направленности.

Подставляя в (10) значение $dn = \dfrac{dB}{2\text{tg}\alpha}$ и пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка, получим

$$d\sigma_n - \left(q - \sigma_n\right)\frac{dB}{B} = 0. \quad (11)$$

Будем считать деформацию в очаге затекания металла во впадину осесимметричной. Далее принимаем, что главные оси напряжений в рассматриваемом элементе соответствуют осям, повернутым относительно системы zOr на угол α, а напряжения σ_n – близкими по своим значениям к тангенциальным напряжениям. В связи с этим можно воспользоваться уравнением пластичности в форме [6], т. е. $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_\text{т}$, в котором

$$\sigma_1 = \frac{q\dfrac{dn}{\cos\alpha}\cos\alpha \pm \tau_\text{к}\dfrac{dn}{\cos\alpha}\sin\alpha}{dn}.$$

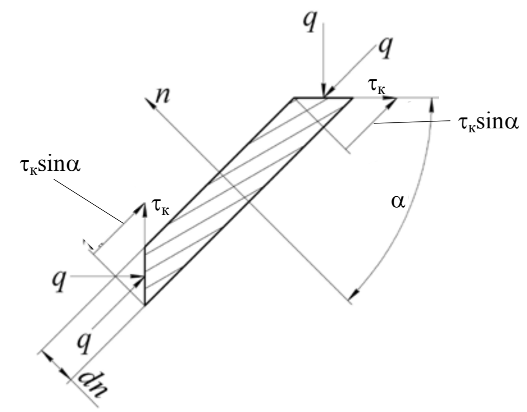

Рис. 4. Расположение составляющих контактных сил трения в выделенном элементе

Вторым членом в числителе можно пренебречь, во-первых, ввиду его малости по сравнению с первым, а во-вторых, из-за того, что в нижней части (рис. 4) выделенного элемента действующие вдоль него напряжения будут представлять сумму $q + \tau_\text{к}\sin\alpha$, а в верхней части – разность $q - \tau_\text{к}\sin\alpha$. Исходя из этого, очевидно, можно воспользоваться некоторым его средним значением, а именно $\dfrac{q + \tau_\text{к}\sin\alpha + q - \tau_\text{к}\sin\alpha}{2} = q$. В этом случае

$\sigma_1 = q$, а $\sigma_3 = \sigma_n$. Таким образом, уравнение пластичности примет вид

$$q - \sigma_n = \sigma_т.$$

Подставляя данное выражение в уравнение (11), получим

$$d\sigma_n - \sigma_т \frac{dB}{B} = 0.$$

Разделим переменные $d\sigma_n = \sigma_т \frac{dB}{B}$, а затем проинтегрируем полученное выражение

$$\sigma_n = \sigma_т \ln B + C. \qquad (12)$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий, согласно которым при $B = B_c$, т. е. на свободной поверхности, $\sigma_n = 0$. Отсюда $C = -\sigma_т \ln B_c$. После подстановки постоянной интегрирования в уравнение (12) получим выражение для расчета напряжения углового прессования

$$\sigma_{n_у} = \sigma_т \ln \frac{B}{B_c}. \qquad (13)$$

Приравняем из двух решений (9) и (13) значения напряжений соответственно $\sigma_{n_{ср}}$ и $\sigma_{n_у}$, так как они действуют в одном и том же направлении. На этом основании можно записать

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

Решим данное равенство относительно искомой величины

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

По (14) произведен расчет параметра B_c при формоизменении фланца толщиной 12 мм с наружным диаметром D = 375 мм из трубы, имеющей наружный диаметр d_1 = 294 мм и внутренний d_0 = 270 мм. В результате такого расчета при $B = h/\sin 45°$ = 17 мм находим значение B_c = 2,83 = $2\sqrt{2}$ мм. При этом фаска получается равной 2×45°. При меньшем значении B_c необходимо увеличить сопротивление фланца радиальной деформации.

Из уравнения (14) определим, на сколько нужно увеличить выражение, стоящее в круглых скобках:

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

Отсюда величина

$$x = \frac{2}{\sqrt{2}}\ln\frac{B}{B_c} - 1 - 2{,}2\ln\frac{D}{d_1} - \frac{d_1 - d_0}{2h}. \qquad (15)$$

В соответствии с (15) определим значение искомой величины, которое для случая B_c = = $1{,}6\sqrt{2}$ мм, что соответствует фаске 1,6×45°, составляет x = 0,317. Далее введем параметр x в уравнение (9), представив его в виде

$$\sigma_{n_{ср}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_т\left(1 + 2{,}2\ln\frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} + x\right). \qquad (16)$$

По данному уравнению рассчитаем для нашего случая значение $\sigma_{n_{ср}} = 2{,}02\sigma_т$. При x = 0 значение $\sigma_{n_{ср}} = 1{,}79\sigma_т$.

Затем согласно (7) запишем

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

Отсюда найдем величину

$$\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{2}}(\sigma_{n_{ср}} - \sigma_r).$$

Решая последнее выражение совместно с уравнением пластичности (4), определим

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{n_{ср}} + \frac{1}{2}\sigma_т, \qquad (17)$$

а далее из этого же условия (4) найдем

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{n_{ср}} + \frac{1}{2}\sigma_т. \qquad (18)$$

Подставив в (18) найденное ранее значение $\sigma_{n_{ср}}$, получим σ_r = 0,92 $\sigma_т$. При x = 0 значение $\sigma_r = 0{,}77\sigma_т$.

Поскольку значение радиального напряжения во фланце при $x > 0$ больше, чем при $x = 0$, для достижения величины $B_c = 1,6\sqrt{2}$ мм требуется дополнительный подпор периферии фланца. С этой целью предложено ввести упорный буртик в матрице для ограничения радиального течения фланца от центра к периферии (рис. 5). Это позволит направить течение металла в сторону заполнения полости, образованной заготовкой, цилиндрической и плоской частями пуансона.

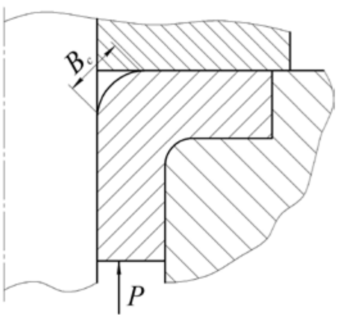

Рис. 5. Конструкция матрицы с ограничением радиального течения фланца

Из уравнения (15) найдем значения переменной x для разных значений B_c.

Таблица 1

Зависимость параметра x от величины B_c

B_c, мм	$2\sqrt{2}$	$1,6\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$
x	0	0,317	0,981

Далее, решая совместно (16) и (17), определим

$$\sigma_z = \frac{1}{2}\sigma_т\left(2 + 2,2\ln\frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} + x\right). \quad (19)$$

По данному уравнению рассчитаем относительную величину осевых напряжений σ_z для разных значений B_c и построим соответствующий график.

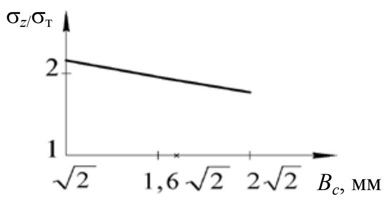

Рис. 6. Зависимость осевых напряжений от величины параметра B_c

Из графика видно, что с уменьшением величины B_c растут значения осевых напряжений.

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

$$P = \sigma_z \pi \frac{d_1^2 - d_0^2}{4}. \quad (20)$$

Если рассматривать данный процесс 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:

$$P_c = \frac{1}{2}\sigma_т \pi d_1 h. \quad (21)$$

Тогда общее усилие деформирования составит

$$P_0 = P + P_c. \quad (22)$$

Подставив в (22) значения составляющих P и P_c соответственно из выражений (20) и (21), с учетом уравнения (19) окончательно запишем

$$P_0 = \frac{1}{2}\pi\sigma_т\left[\frac{d_1^2 - d_0^2}{4}\left(2 + 2,2\ln\frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} + x\right) + d_1 h\right]. \quad (23)$$

В соответствии с полученным выражением на графике (рис. 7) показано изменение усилия формоизменения в зависимости от величины переходной кромки B_c при деформировании трубной заготовки с ранее заданными параметрами из стали 30 при температуре 900 °С. Предел текучести для этой стали при заданной температуре согласно [8] составляет 80 МПа.

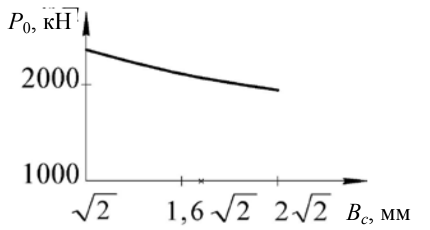

Рис. 7. Зависимость усилия формоизменения переходной кромки от ее величины

Из графика следует, что даже для достижения минимальной величины переходной кромки B_c, обеспечивающей фаску 1×45°, достаточно пресса с номинальным усилием 2500 кН.

ВЫВОД

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 / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.
2. **Зубцов, М. Е.** Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. **Попов, Е. А.** Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1968. – 284 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. **Особенности** формообразования пластическим деформированием фланца в трубной заготовке / Л. А. Исаевич [и др.] // Металлургия. – Минск: Наука и техника, 2005. – Вып. 29. – С. 157–164.
6. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. И. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
7. **Исаевич, Л. А.** Способ повышения усталостной прочности и долговечности малолистовых рессор / Л. А. Исаевич, Д. М. Иваницкий // Металлургия. – Минск: Наука и техника, 2005. – Вып. 29. – С. 148–157.
8. **Третьяков, А. В.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

Поступила 22.02.2007

УДК 621.891.8

ВОДОРОДОСТОЙКИЕ ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТРЕНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Доктора техн. наук, профессора ***ШЕЛЕГ В. К., ПРИСЕВОК А. Ф.***

Белорусский национальный технический университет

Термодинамический анализ адсорбции и абсорбции водорода металлами, а также результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований систем «металл – водород» свидетельствуют о том, что водород растворяется в окта- и тетрапорах кристаллической решетки металлов в ионизированном состоянии, накапливается в порах и других дефектах кристаллической решетки в молекулярной форме, вступает в химическое взаимодействие с различными элементами и фазами, имеющимися в металлах и сплавах, а также адсорбируется внутри металла на поверхностях микрополостей, пор, микротрещин и т. п. и сегрегирует на несовершенствах кристаллической решетки. В зависимости от условий насыщения водородом и природы сплавов будут преобладать те или иные формы состояния водорода в металлах, между которыми существует динамическое равновесие. Различные формы существования водорода в стали подтверждаются опытами фракционного опреде-