

УДК 621.983

Бут А. Ю.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СТЕПЕНЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СПРЯМЛЕНИИ ОТВОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕТВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТРОЙНИКОВ

Элементы трубопроводных систем, в частности тройники, находят широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства, особенно в судостроении, самолётостроении и нефтегазовой промышленности. Постоянно расширяется номенклатура изделий и повышаются требования к их качеству, что обуславливает актуальность интенсификации технологических процессов изготовления данных деталей.

Для совершенствования процесса изготовления цельноштампованных тройников в работах [1–5] предложен способ, позволяющий за один переход получать готовый тройник с относительной высотой отвода  $H/D = 0,9$  (где  $H$  – высота ответвления от срединной линии,  $D$  – диаметр магистрали). Способ совмещает операции вытяжки отвода на трубной заготовке, пробивки его дна и дальнейшего оформления стенки ответвления [5]. Повышение высоты тройника при однопереходной штамповке по указанному способу осуществляется путем преобразования некоторой части донной поверхности получаемого вытяжкой отвода в стенку ответвления готового тройника. Это достигается путём пробивки в дне отвода отверстия диаметром, меньшим диаметра отвода и последующим спрямлением его стенок.

По схеме напряжений, действующих в очаге деформации, и характеру деформирования спрямление части дна отвода аналогично процессу спрямления, имеющему место при сходе заготовки со скруглённой кромки пуансона во время отбортовки жёстким инструментом [5–10]. В условиях однопереходной штамповки тройников в качестве деформирующей среды выступает эластичный наполнитель – полиуретан, что приводит к изменениям контактных условий. Методика учета влияния касательных напряжений  $\mu q$  от сил трения на величину меридиональных растягивающих напряжений для отбортовки отверстий эластичной средой дана в работе [8].

Общая схема процесса спрямления дна отвода при однопереходной штамповке тройников представлена на рис. 1, а схема процесса деформирования – на рис. 2.

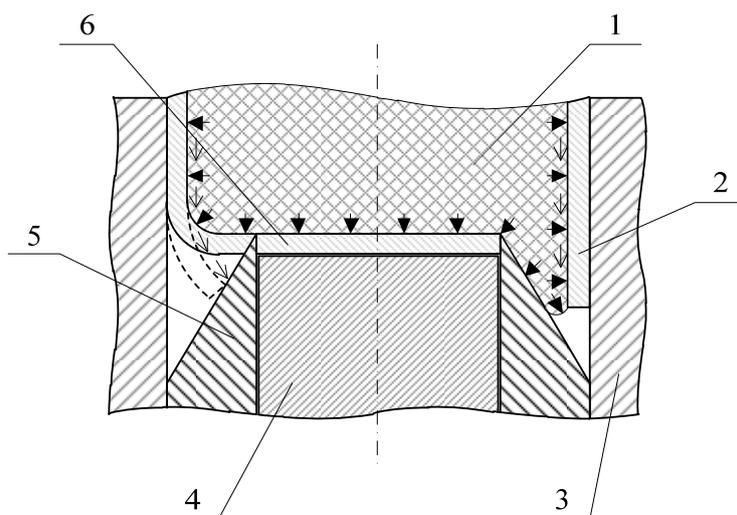


Рис. 1. Общая схема процесса спрямления дна отвода:

1 – эластичный инструмент; 2 – стенка ответвления; 3 – матрица; 4 – подпор дна отвода; 5 – пробивной элемент; 6 – отход;  $\blacktriangleright$  – действие давления эластичного инструмента  $q$  в полости отвода;  $\Rightarrow$  – действие касательных напряжений  $\mu q$  от сил трения между поверхностью заготовки и эластичным инструментом

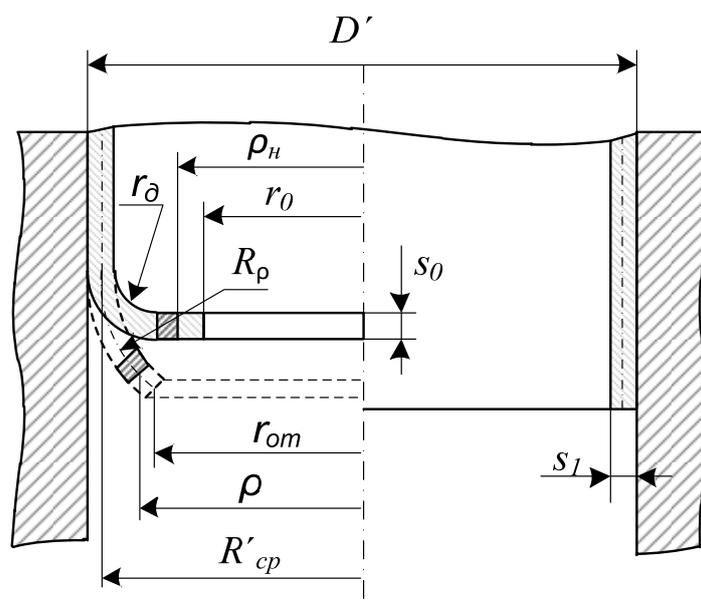


Рис. 2. Схема процесса деформирования при спрямлении дна отвода в стенку ответвления

Допустимую высоту части ответвления, получаемой спрямлением, подобно отбортовке, ограничивает возможность разрушения заготовки с образованием трещины, берущей начало от кромки отверстия [8].

Объясняется это тем, что краевая часть заготовки деформируется по схеме, близкой к линейному растяжению в тангенциальном направлении и получает наибольшую деформацию. Данную тангенциальную деформацию растяжения можно найти из выражения [8]:

$$\psi = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\psi$  – относительная деформация второго рода;

$\Delta\rho$  – изменение радиуса, координирующего рассматриваемый элемент в данный момент деформирования;

$\rho$  – радиус рассматриваемого элемента с начальным радиусом  $\rho_n$  в данный момент деформирования.

Конечная тангенциальная деформация для кольцевого элемента у кромки отверстия при увеличении радиуса от  $r_0$  до  $R'_{cp}$  определится из выражения:

$$\psi = \frac{R'_{cp} - r_0}{R'_{cp}} = 1 - \frac{r_0}{R'_{cp}}. \quad (2)$$

Учитывая, что этот кольцевой элемент деформируется в условиях, близких к линейному растяжению, устойчивая деформация равномерного удлинения (до начала образования шейки) может быть в первом приближении принята равной равномерной деформации уменьшения поперечного сечения  $\psi_{ш}$  при испытании на растяжение. В этом случае, приняв  $\psi = \psi_{ш}$ , из предыдущего соотношения получим:

$$K_{cn} = \frac{1}{m_{cn}} = \frac{D'}{d_0} = \frac{R'_{cp}}{r_0} = \frac{1}{1 - \psi_{ш}}. \quad (3)$$

Однако, как показывает практика, для процесса отбортовки аналогичного спрямлению формула (3) не позволяет с достаточной точностью определить коэффициент отбортовки [7, 8], т. к. условия деформирования краевого элемента существенно отличаются от условий деформирования образца при испытании на линейное растяжение. Кроме того, на допустимую

деформацию краевого элемента значительное влияние оказывают дополнительные факторы, такие как состояние металла у кромки отверстия и отношение толщины заготовки к диаметру исходного отверстия и в значительно меньшей степени форма пуансона [7, 8]. Таким образом, в связи с отсутствием методики учёта влияния концентраторов напряжений и деформационного упрочнения вдоль кромки технологического отверстия, полученного пробивкой, сверлением или каким либо другим способом, аналитическая функция (в явном виде) для определения коэффициента отбортовки пока не получена [6].

Целью данной работы является разработка методики оценки предельных степеней деформации при спрямлении донной части отвода в стенку ответвления в условиях однопереходной штамповки тройников по способу [5].

Для определения общей способности материала к однопереходной штамповке тройников приближенная оценка предельных степеней деформации при спрямлении может быть выполнена с использованием методики оценки штампуемости по коэффициенту локального использования пластичности [11, 12]. Для этого рассмотрим соотношения главных деформаций, имеющих место при спрямлении [13].

Главные деформации  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_\rho$  могут быть представлены в следующем виде.

Максимальная по абсолютной величине деформация тангенциального растяжения:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} = \frac{\rho}{\rho_n} - 1, \quad (4)$$

наибольшая величина которой у кромки отверстия:

$$\varepsilon_{\theta \max} = \frac{R'_{cp}}{r_0} - 1. \quad (5)$$

Деформации в нормальном к поверхности заготовки (по толщине борта) направлении:

$$\varepsilon_n = \frac{s}{s_0} - 1. \quad (6)$$

Деформация в меридиональном (по высоте борта) направлении может быть определена из соотношений, выражающих связь между интенсивностями деформаций и напряжений:

$$\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_\rho = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\varepsilon_\theta; \quad \sigma_\rho - \frac{1}{2}\sigma_\theta = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\varepsilon_\rho.$$

Откуда при  $\sigma_\rho = 0$ , когда  $\rho = r_0$ , имеем:

$$\varepsilon_\rho = -\frac{1}{2}\varepsilon_\theta, \quad (7)$$

то есть:

$$\varepsilon_\rho = -\frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\rho_n} - 1\right). \quad (8)$$

Согласно [7, 8], аналогично отбортовке укорочение элементов в меридиональном направлении для части заготовки, граничащей с отверстием, до некоторой степени компенсируется удлинением элементов в меридиональном направлении для части заготовки, граничащей с недеформируемым участком. Это обстоятельство позволяет в первом приближении принять, что ширина спрямляемой части заготовки равна длине развёртки по срединной поверхности части ответвления, полученной в результате спрямления. Это условие с удовлетворительной точностью может быть использовано для определения диаметра отверстия по заданным размерам получаемого ответвления.

Таким образом, считаем, что в процессе спрямления донной части отвода в исследуемой области деформация в меридиональном (по высоте борта) направлении  $\varepsilon_\rho$  равна нулю, а главными деформациями являются деформации тангенциального растяжения  $\varepsilon_\theta$  и утонения стенки ответвления  $\varepsilon_n$ :

$$\varepsilon_\rho = 0, \quad \varepsilon_\theta = -\varepsilon_n. \quad (9)$$

В качестве характеристики локального деформированного состояния принимаем коэффициент локального использования пластичности металла [11], который характеризует использование пластичности при данном локальном соотношении напряжений:

$$\eta = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i(kp)}}. \quad (10)$$

Когда  $\eta = 1$ , это указывает на опасность появления локального утонения и затем разрывов заготовки, то есть на исчерпание ресурса пластичности в данном участке заготовки.

Следуя деформационной теории, из пропорциональности девиаторов напряжений и деформаций, и считая, что в исследуемой области – на кромке отверстия  $\sigma_\rho = 0$ , имеем:

$$\frac{2\varepsilon_n + \varepsilon_\theta}{2\varepsilon_\theta + \varepsilon_n} = \frac{\sigma_n}{\sigma_\theta} = m \leq 1, \quad (11)$$

где  $m$  – показатель напряженно-деформированного состояния [12].

Величина показателя напряженно-деформированного состояния  $m$  может меняться в интервале  $(-\infty; +1)$ . При этом, для случая двухосного растяжения, имеющего место при спрямлении, она находится в области  $0,5 \leq m \leq 1$ .

Интенсивность деформаций, возникающая в процессе формоизменения, подсчитывается по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_\theta \varepsilon_n + \varepsilon_n^2}. \quad (12)$$

Критическая величина интенсивности деформаций для случая двухосного растяжения ( $0,5 \leq m \leq 1$ ) рассчитывается:

$$\varepsilon_{i(kp)} = \frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{2-m} n, \quad (13)$$

где  $n$  – показатель деформационного упрочнения металла, определяемый из справочной литературы или экспериментально.

Когда процесс деформирования состоит из нескольких этапов, суммарная интенсивность деформаций представляет собой накопленную, то есть сумму интенсивностей деформаций за каждый этап –  $\sum_1^k \varepsilon_i$ , где  $k$  – число этапов деформирования. В этом случае результирующая критическая интенсивность деформаций определяется соотношением:

$$\varepsilon_{i(kp)}^* = \frac{\sum_1^k \varepsilon_i}{\eta^*}. \quad (14)$$

В случае спрямления нас интересует накопленная интенсивность деформаций краевых элементов заготовки, образующих контур отверстия, то есть находящихся на его кромке – с начальным радиусом  $\rho = r_0$ . При однопереходной штамповке тройников по рассматриваемому

методу эти элементы перед началом процесса спрямления проходят ещё два этапа деформирования – вытяжку и пробивку [1–5]. Таким образом, суммарная интенсивность деформаций рассматриваемых элементов составляет:

$$\varepsilon_i^* = \sum_1^3 \varepsilon_i = \varepsilon_i^{бвм} + \varepsilon_i^{нр} + \varepsilon_i^{сн}, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_i^{бвм}$ ,  $\varepsilon_i^{нр}$ ,  $\varepsilon_i^{сн}$  – интенсивности деформаций элементов, полученные, соответственно, на этапах вытяжки, пробивки и спрямления.

Тогда качественное протекание процесса спрямления без образования трещин на кромке ответвления возможно при соблюдении условия:

$$\varepsilon_i^* < \varepsilon_{i(кр)}^*. \quad (16)$$

Таким образом, при известных параметрах готового изделия, определение предельного коэффициента спрямления  $K_{сн}$  то есть минимально допустимого диаметра пробиваемого отверстия  $d_0$  возможно по следующей схеме. Задаваясь каким-либо диаметром отверстия, по формуле (12) можно определить интенсивность деформаций элементов заготовки на этапе спрямления  $\varepsilon_i^{сн}$ , а затем по формуле (15) рассчитать суммарную интенсивность деформаций за три этапа  $\varepsilon_i^*$ .

С достаточной точностью можно считать, что на этапе вытяжки отвода элементы исследуемой области (периметр пробиваемого отверстия) вследствие трения на поверхностях контакта подпор – заготовка и заготовка – эластичная среда не претерпевают деформации в меридиональном направлении. На этапе пробивки меридиональная деформация этих элементов также равна нулю. В этом случае приближенно можно принять, что данные элементы на протяжении всего процесса находятся в состоянии плоского деформирования. Тогда, имея в виду (9) и подставляя вместо  $\varepsilon_i$  значение  $\varepsilon_i^*$  в соотношение (12), находим из него величины составляющих накопленных деформаций  $\varepsilon_\theta^*$  и  $\varepsilon_n^*$ :

$$\varepsilon_\theta^* = \varepsilon_i^*; \quad \varepsilon_n^* = -\varepsilon_\theta^*. \quad (17)$$

Подставляя найденные значения  $\varepsilon_\theta^*$  и  $\varepsilon_n^*$  в выражение (11), определяем показатель напряженно-деформированного состояния  $m$  для рассматриваемых элементов заготовки. Используя  $m$ , по формуле (14) вычисляем результирующую критическую интенсивность деформаций  $\varepsilon_{i(кр)}^*$  и определяем коэффициент локального использования пластичности с учётом трёх этапов деформирования:

$$\eta^* = \frac{\varepsilon_i^*}{\varepsilon_{i(кр)}^*}. \quad (18)$$

Если полученное значение  $\eta^* < 1$ , то штамповка данной детали возможна, если  $\eta \geq 1$ , то необходимо увеличить диаметр пробиваемого отверстия.

Исходя из вышеизложенного, для определения радиуса пробиваемого отверстия может быть предложена следующая методика.

Для конкретного типоразмера детали в справочной литературе находится значение суммарной критической интенсивности деформаций  $\varepsilon_{i(кр)}^*$ . Подставляя эту величину в (12) и имея в виду (9), находим значение  $\varepsilon_n^*$ :

$$\varepsilon_n^* = -\frac{\varepsilon_{i(кр)}^* \sqrt{3}}{2}. \quad (19)$$

Из экспериментальных данных [1–4] известно, что предельная степень деформации утонения  $\varepsilon_n$  в рассматриваемом сечении при вытяжке отвода в способе [5] обычно составляет до 10 % от исходной толщины заготовки. Исходя из этого, можем заключить, что:

$$\varepsilon_n^{cn} = \varepsilon_n^* + 0,1. \quad (20)$$

Учитывая (9), из (5) получим:

$$r_0 \geq \frac{R'_{cp}}{\left( \left( -\frac{\varepsilon_{i(cp)}^* \sqrt{3}}{2} + 0,1 \right) + 1 \right)}. \quad (21)$$

### ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности процесса спрямления дна отвода в стенку ответвления в условиях однопереходной штамповки тройников по способу [5]. Предложена методика оценки предельных степеней деформации для данного процесса, основанная на оценке штампуемости металла по коэффициенту локального использования пластичности. Данная методика может быть использована для определения общей способности конкретного материала к однопереходной штамповке тройников.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митичкина Н. Г. Совершенствование процесса формообразования элементов трубопроводов / Н. Г. Митичкина, А. Ю. Бут // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск, 2010. – Вып. № 30. – С. 194–201.
2. Митичкина Н. Г. Совершенствование процесса формообразования тройников эластичной средой / Н. Г. Митичкина, А. Ю. Бут // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 112–117.
3. Исследование процесса изготовления цельноштампованных тройников за один технологический переход с применением заготовок со скошенными кромками // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Вып. 32. – Алчевск : ДонГТУ, 2010. – С. 254–260.
4. Экспериментальные исследования процесса получения отверстий под оформление ответвлений труб // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. : темат. випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 45. – С. 158–163.
5. Пат. 96687, Україна, МПК В21С 37/29(2006.01), В21D 26/02(2006.01). Спосіб виготовлення порожнистих деталей з відгалуженнями і пристрій для його здійснення / Митичкіна Н. Г., Бут О. Ю. – № а201009324; заявл. 26.07.2010; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 23.
6. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки : учебное пособие для вузов / Е. А. Попов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 283 с.
8. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с. : ил.
9. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
10. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева; ред. совет Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1985–1987. – 544 с. : ил.
11. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 522 с.
12. Аверкиев А. Ю. Методы оценки штампуемости тонколистового металла / А. Ю. Аверкиев. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1974. – 96 с.
13. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1976. – 368 с.

Бут А. Ю. – аспирант ДонГТУ.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: butalexandr@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 28.03.2012 г.