

УДК 621.983

Митичкина Н. Г.  
Бут А. Ю.**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОБИВКИ ОТВОДА В УСЛОВИЯХ  
ОДНОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТРОЙНИКОВ**

Проблемы повышения производительности и снижения трудоемкости технологических процессов изготовления продукции из трубных заготовок являются актуальными для экономики Украины. В целях совершенствования процесса получения цельноштампованных тройников сотрудниками Донбасского государственного технического университета предложен новый способ их изготовления [1–4]. Он совмещает в себе операции вытяжки отвода на трубной заготовке, пробивки его дна и дальнейшего оформления стенки ответвления, и позволяет получать готовое изделие – тройник за один технологический переход. Успешное применение данного способа в производстве сопряжено с необходимостью определения энергосиловых показателей указанного технологического процесса, одним из этапов которого является отделение технологического отхода.

Схема процесса разделения металла в предлагаемом способе однопереходной штамповки тройников [4] отличается от известных способов получения отверстий, так как при деформировании на заготовку воздействует пробивной элемент клинообразной формы замкнутого контура, внедряющийся под действием эластичного наполнителя на всю толщину заготовки до полного отделения отхода (рис. 1).

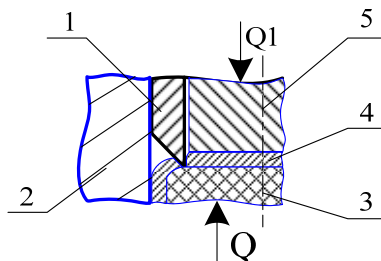


Рис. 1. Схема разделения металла при пробивке дна ответвления клинообразным пробивным элементом:

1 – пробивной элемент; 2 – контейнер; 3 – эластичный наполнитель; 4 – отход; 5 – подпор

Целью данной работы является разработка математической модели процесса разделения материала при пробивке дна отвода в условиях однопереходной штамповки тройников.

Энергосиловые показатели предложенного способа пробивки отверстия можно оценить рассматривая пробивной элемент в качестве лезвия, внедряемого в материал под углом 90 градусов. В дальнейших рассуждениях материал заготовки считается изотропным, упругопластическим и упрочняющимся.

Разделению материала на части под воздействием режущего инструмента предшествует процесс предварительного смятия им материала до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения  $\sigma_p$ . Момент возникновения последнего определяется значением усилия  $P$ , прикладываемого к режущему инструменту и преодолевающего ряд сопротивлений различного происхождения, возникающих в материале. Усилие  $P$ , приложенное к инструменту, при котором завершается процесс смятия материала и начинается его разделение, является максимальным или критическим, и обозначается  $P_{кр}$  [5]. Таким образом, для начала процесса разделения материала должно соблюдаться условие:

$$P_{кр} \geq \sum P_c, \quad (1)$$

где  $\Sigma P_c$  – сумма всех сил сопротивления, действующих в плоскости режущего инструмента (по нормали к плоскости материала).

При внедрении клинообразного пробивного элемента в металл на него при этом действуют следующие силы (рис. 2):

- направленная вверх сила сопротивления разрушению металла под режущей кромкой ( $P_{рез}$ );
- горизонтальные силы обжатия пробивного элемента металлом, действующие на его боковые грани и возникающие в результате расширения слоя металла из-за внедрения клина ( $P_{обж}$ );
- направленная вверх сила сопротивления металла смятию фаской пробивного элемента ( $P_{сж}$ ).

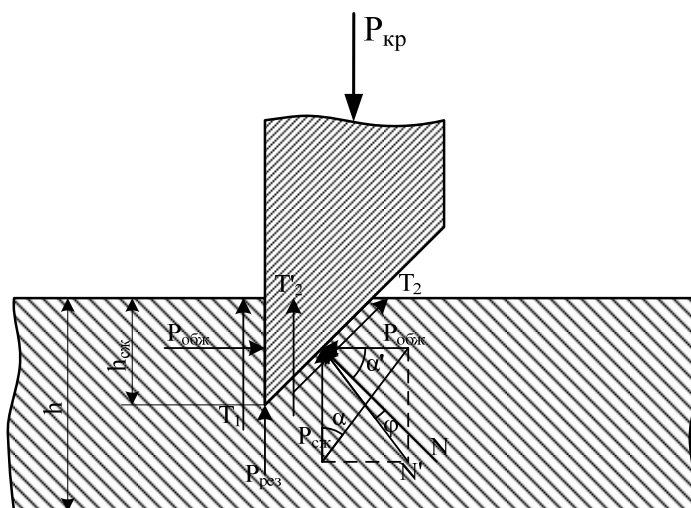


Рис. 2. Схема силового взаимодействия клинообразного пробивного элемента с металлом заготовки

Таким образом, на фаску пробивного элемента действует сила  $N$ , характеризующая сопротивление материала раздвижению клином и являющаяся суммой проекций сил  $P_{обж}$  и  $P_{сж}$  на направление нормали [5]:

$$N = P_{сж} \sin \alpha + P_{обж} \cos \alpha . \quad (2)$$

От нормальной силы  $N$  на фаске пробивного элемента возникает сила трения  $T_2$ :

$$T_2 = Nf , \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения металла заготовки о металл пробивного элемента,  $f = \operatorname{tg} \varphi$ ;  $\varphi$  – угол трения.

Силу  $N$  можно выразить через угол трения:

$$N = \sqrt{P_{обж}^2 + P_{сж}^2} \cos \varphi . \quad (4)$$

Сила трения  $T_1$  возникает на другой грани пробивного элемента в результате действия силы  $P_{обж}$ :

$$T_1 = P_{обж} f . \quad (5)$$

Сила  $T_1$  направлена вверх, а  $T_2$  – под углом  $\alpha$  заострения (заточки) рабочей части пробивного элемента. Вертикальная проекция силы  $T_2$  будет равна:

$$T_2' = T_2 \cos \alpha . \quad (6)$$

Подставив значение  $N$ , получаем [6]:

$$T_2' = f \left( P_{сж} \frac{1}{2} \sin 2\alpha + P_{обж} \cos^2 \alpha \right) . \quad (7)$$

Таким образом, в момент начала разделения (резания) металла критическая сила  $P_{кр}$ , приложенная к пробивному элементу, должна преодолеть сумму всех сил, действующих в его плоскости (по нормали к плоскости металла заготовки) [5, 6]:

$$P_{кр} = P_{рез} + P_{сж} + T_1 + T_2' . \quad (8)$$

Силу  $P_{рез}$  можно определить как произведение площади рабочей кромки пробивного элемента, находящейся в контакте с металлом  $F_{кр}$ , на разрушающее контактное напряжение  $\sigma_p$ :

$$P_{рез} = F_{кр} \sigma_p . \quad (9)$$

Значение  $F_{кр}$  определяется как произведение толщины режущей кромки пробивного элемента  $\delta$  на периметр (длину) последнего  $l$ :

$$F_{кр} = \delta l . \quad (10)$$

Разрушающее контактное напряжение является индивидуальной величиной для каждого вида материала и может быть определено эмпирически [5].

Зависимость величин сил  $P_{сж}$  и  $P_{обж}$ , входящих в выражение (8), от других параметров процесса можно определить аналитически.

Относительное сжатие (относительная деформация в вертикальном направлении) любого вертикального столбика в пределах фаски на расстоянии  $x$  от вершины пробивного элемента при его внедрении в дно отвода будет:

$$\varepsilon_{сж} = \frac{h_{сжx}}{h} . \quad (11)$$

В качестве напряжения  $\sigma$  в данном случае принимаем значение  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести выбранного материала заготовки. Рост этого напряжения  $\sigma = P_{сж} / F$  с увеличением  $\varepsilon$  отстаёт от роста силы  $P_{сж}$ , вследствие того, что с внедрением пробивного элемента в металл заготовки при условии  $h_{сж} < b/tg\alpha$  (где  $b$  – толщина ножа), площадь  $F$ , на которую действует сила  $P_{сж}$ , растёт по закону:

$$F_x = lh_{сж} \tan \alpha . \quad (12)$$

Зависимость между  $\varepsilon$  и  $\sigma$ , то есть упрочнение металла в процессе деформирования, учитываем по закону [7]:

$$\sigma_s = \sigma_s' + A\varepsilon_{сж}^n , \quad (13)$$

где  $\sigma_s'$  – напряжение течения металла заготовки после первого этапа деформирования – вытяжки отвода;

$A, n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида материала.

Силу смятия при внедрении  $P_{сж}$ , действующую со стороны материала заготовки, можно определить по формуле:

$$P_{сж} = (\sigma_s' + A\varepsilon_{сж}^n) lh_{сж} tg\alpha . \quad (14)$$

Тогда, учитывая (11), для пробивного элемента единичной длины ( $l = 1$ ) можно записать:

$$P_{сж} = \left( \sigma_s' + A \left( \frac{h_{сж}}{h} \right)^n \right) h_{сж} tg\alpha . \quad (15)$$

Путём преобразований и интегрирования по  $h_{сж}$  для пробивного элемента единичной длины получаем выражение для определения усилия внедрения пробивного элемента:

$$P_{сж} = \frac{A}{n+2} tg\alpha h_{сж}^{n+2} + \frac{\sigma_s' tg\alpha h_{сж}^2}{2} . \quad (16)$$

В том случае, когда в горизонтальном направлении относительная деформация равна  $\varepsilon_{обж}$ , с учётом (13), элементарная сила обжатия составляет:

$$dP_{обж} = \sigma'_s + A\varepsilon_{обж}^n dh_{сж} . \quad (17)$$

Относительную деформацию в горизонтальном направлении можно выразить через относительную деформацию в вертикальном направлении. При этом, используя выражение (11), получаем:

$$\varepsilon_{обж} = \varepsilon_{сж} \nu = \nu \frac{h_{сж}}{h} , \quad (18)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Тогда элементарную силу, действующую со стороны горизонтального столбика, можно выразить следующим образом:

$$dP_{обж} = \left( \sigma'_s + A \left( \nu \frac{h_{сж}}{h} \right)^n \right) dh_{сж} . \quad (19)$$

А силу бокового обжатия инструмента:

$$P_{обж} = \sigma'_s \int_0^{h_{сж}} dh_{сж} + \frac{A\nu^n}{h^n} \int_0^{h_{сж}} h_{сж}^n dh_{сж} . \quad (20)$$

Путём интегрирования и математических преобразований выражения (20), получаем формулу для определения силы обжатия  $P_{обж}$ :

$$P_{обж} = \sigma'_s h_{сж} + \frac{A\nu^n h_{сж}^{n+1}}{h^n (n+1)} . \quad (21)$$

Подставляя значения всех сил, противодействующих  $P_{кр}$ , в выражение (8), получаем значение критической силы для пробивного элемента единичной длины ( $l = 1$ ):

$$P_{кр} = \delta\sigma_p + \left( \frac{A}{h^n} \text{tg}\alpha h_{сж}^{n+2} + \frac{\sigma''_s \text{tg}\alpha h_{сж}^2}{2} \right) + f \left( \sigma''_s h_{сж} + \frac{A\nu^n h_{сж}^{n+1}}{h^n (n+1)} \right) + \\ + f \left( \left( \frac{A}{h^n} \text{tg}\alpha h_{сж}^{n+2} + \frac{\sigma''_s \text{tg}\alpha h_{сж}^2}{2} \right) \frac{1}{2} \sin 2\alpha + \left( \sigma''_s h_{сж} + \frac{A\nu^n h_{сж}^{n+1}}{h^n (n+1)} \right) \cos^2 \alpha \right) \quad (22)$$

Анализ полученной формулы показывает, что по мере внедрения пробивного элемента в металл заготовки критическая сила возрастает нелинейно. На начальном этапе угол заточки пробивного элемента играет незначительную роль, т. к. для различных углов заточки при внедрении инструмента на 30 % толщины заготовки критические силы отличаются незначительно. По мере дальнейшего углубления пробивного элемента разница усилий увеличивается, достигая максимума в конце процесса разделения. Интенсивность увеличения силы тем больше, чем больше угол заточки пробивного элемента. Таким образом, очевидно, что важной задачей является отыскание оптимального значения этого угла для конкретного вида материала и параметров процесса. Эти соображения хорошо иллюстрируют зависимости, представленные на рис. 3 и рис. 4. Расчёты были проведены для заготовок из сплава АМг1 со следующими технологическими параметрами: толщина стенки трубной заготовки  $s_0 = 1$  мм; диаметр магистрали  $D = 20$  мм; диаметр отвода по срединной линии  $D'_{cp} = 19$  мм; угол заточки пробивного элемента  $\alpha = 30, 45, 60$  градусов, коэффициент трения  $f = 0,15$ .

Полное усилие, необходимое для отделения отхода можно определить как произведение критической силы на периметр реза.

Важнейшими составляющими критической силы, значительно влияющими на процесс отделения отхода являются силы  $P_{обж}$  и  $P_{сж}$ , зависящие от толщины материала и заточки пробивного элемента.

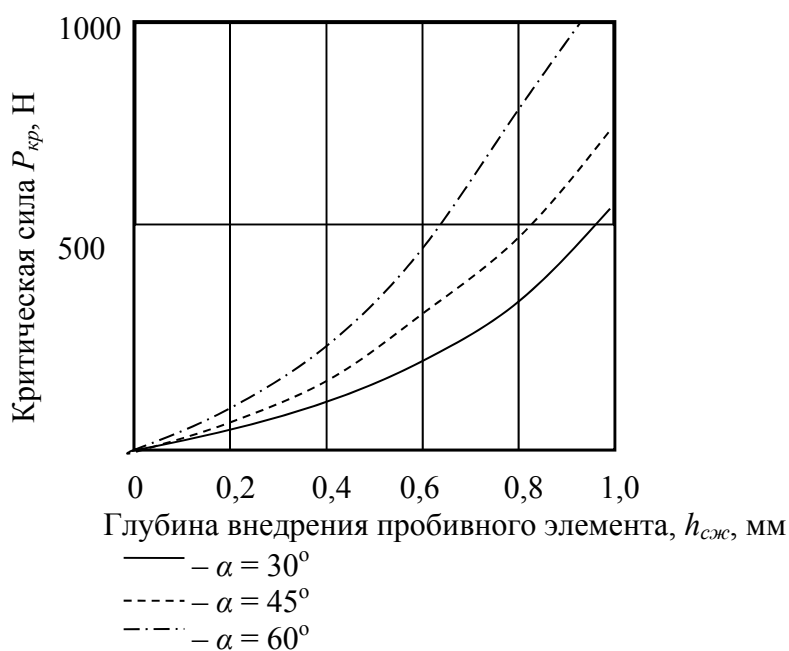


Рис. 3. Графики зависимости критического усилия процесса пробивки  $P_{кр}$  от глубины внедрения пробивного элемента  $h_{сж}$  для углов заточки  $\alpha = 30, 45, 60^\circ$  при коэффициенте трения  $f = 0,15$

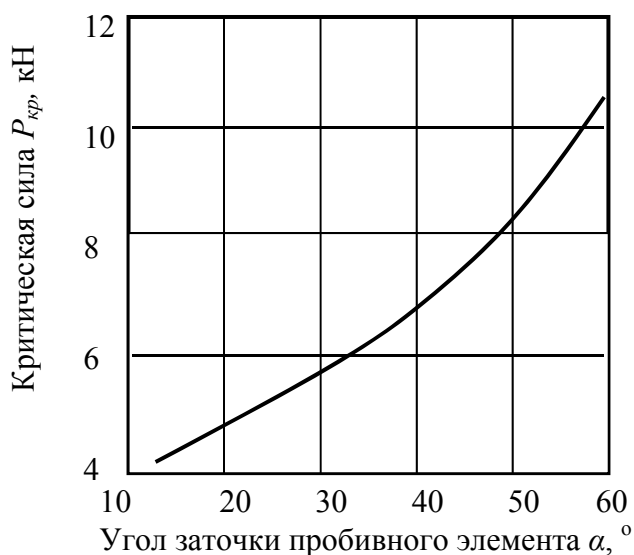


Рис. 4. График зависимости критического усилия процесса пробивки  $P_{кр}$  от угла заточки пробивного элемента  $\alpha^\circ$ , для максимальной глубины внедрения –  $h_{сж} = 1$  мм (момент окончания процесса пробивки)

Зависимости сил  $P_{обж}$  и  $P_{сж}$  от глубины внедрения пробивного элемента  $h_{сж}$  для углов заточки  $\alpha = 30, 45, 60^\circ$  проиллюстрированы графиками на рис. 5. Сила  $P_{обж}$  постоянна для данного вида материала и монотонно возрастает по мере углубления пробивного элемента в заготовку (зависимость имеет практически линейный вид), а сила  $P_{сж}$  тем больше, чем больше угол заточки пробивного элемента, а с увеличением угла заточки пробивного элемента влияние силы  $P_{сж}$  на величину критического усилия пробивки возрастает.

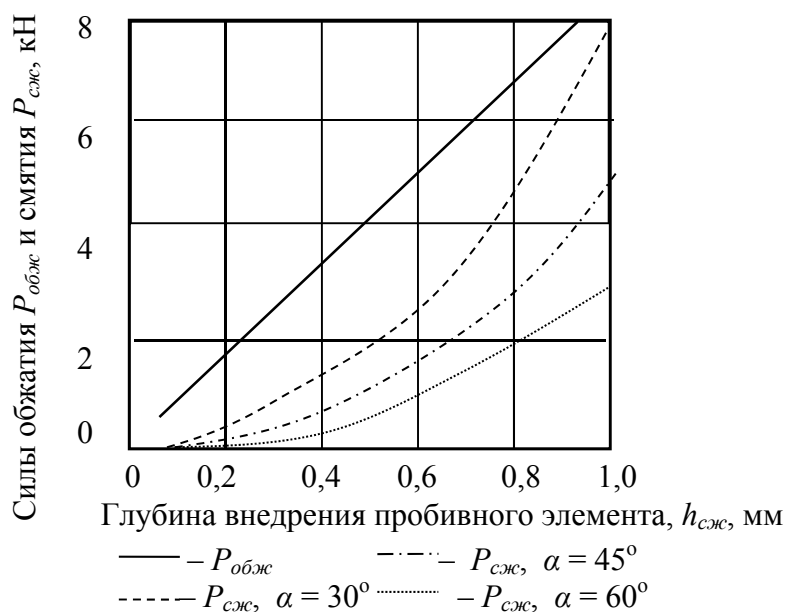


Рис. 5. Графики зависимости сил  $P_{обж}$  и  $P_{сж}$  от глубины внедрения пробивного элемента  $h_{сж}$  для углов заточки  $\alpha = 30, 45, 60^\circ$  при коэффициенте трения  $f = 0,15$

### ВЫВОДЫ

Предложена математическая модель силового взаимодействия клинообразного пробивного элемента замкнутого контура с металлом заготовки при пробивке дна отвода в условиях однопереходной штамповки тройников, позволяющая учесть упрочнение металла в процессе деформирования, угол заточки пробивного элемента, силы трения между пробивным элементом и материалом трубной заготовки. Модель может быть использована при проектировании технологического процесса штамповки тройников по способу [4].

### 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 : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 112–117.
3. Экспериментальные исследования процесса получения отверстий под оформление ответвлений труб // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць : Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 158–163.
4. 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 / Мітічкіна Н. Г., Бут О. Ю. – № а201009324 ; заявл. 26.07.2010 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
5. Резник Н. Е. Теория резания и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1975. – 311 с.
6. Бараян А. Г. Особенности резания лезвием и анализ силового воздействия на контакте лезвий / А. Г. Бараян // Естественнаучная. – 2003. – № 1 (6). – С. 50–53.
7. Теория пластических деформаций металлов / [Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.] ; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с., ил.

Митичкина Н. Г. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ;  
Бут А. Ю. – ст. лаборант ДонГТУ.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: butalexandr@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2013 г.