

# Технология и технологические машины

УДК.621.98.04

## Исследование стабильности совмещенного процесса вытяжки и отбортовки при штамповке колец с двойными стенками

**М.М. Петрушина, С.А. Евсюков, А.С. Езжев**

*Исследовано влияние отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки на стабильность совмещенного процесса при получении профильных колец с двойными стенками при использовании метода конечных элементов. Для оценки стабильности фиксируется высота стенок. Построена область пар значений относительной толщины и соотношения коэффициентов, при которых процесс стабилен.*

**Ключевые слова:** вытяжка, отбортовка, математическое моделирование.

## Investigation of stability of combined drawing and flanging process when stamping double walled rings

**M.M. Petrushina, S.A. Evsyukov, A.S. Ezzhev**

*The article investigates the influence of the relation between the drawing and flanging coefficients on the stability of the combined process when obtaining double walled profile rings. The finite element method has been used. In order to assess the stability the walls height is fixed. The relative thickness and coefficients values pairs ratio diagram for the process stability has been built.*

**Keywords:** deep drawing, hole flanging, simulation.



**ПЕТРУШИНА**  
Марина Михайловна  
аспирантка



**ЕВСЮКОВ**  
Сергей Александрович  
доктор технических наук,  
профессор



**ЕЗЖЕВ**  
Альберт Сергеевич  
кандидат технических  
наук, доцент  
кафедры «Технологии  
обработки давлением»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: ezjev@rambler.ru

В машиностроении есть класс деталей, имеющих форму колец с профильной образующей (рис. 1). Существующий способ изготовления профильных колец методами обработки резанием характеризуется большим отходом металла, дальнейшее использование которого затруднительно. Значительной экономии металла при изготовлении профильных колец можно добиться за счет применения операций листовой штамповки [1].



Рис. 1. Профильное кольцо

Среди различных вариантов изготовления колец методами листовой штамповки наиболее экономичным является метод получения колец совмещением вытяжки и отбортовки [2]. Этот метод позволяет интенсифицировать процесс и получить деталь за один переход с минимальными отходами металла [3].

При совмещении процессов вытяжки и отбортовки возможно преобладание одной из операций над другой, что приводит к разности высот наружной и внутренней стенок колец и в результате к увеличению расхода металла за счет весьма трудоемкой дополнительной обрезки торцов [4]. Для более эффективного управления этим процессом необходимо выявить закономерности течения металла в совмещенном процессе и определить оптимальные отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для получения требуемого соотношения высот стенок колец.

Исследование совмещенного процесса вытяжки и отбортовки проведено методом конечных элементов с использованием специа-

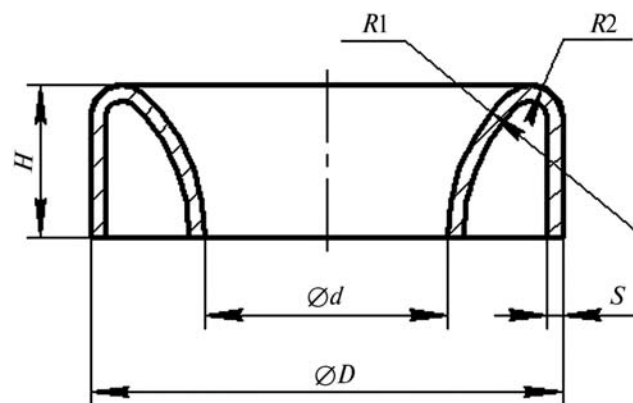


Рис. 2. Чертеж профильного кольца

лизированной программы для моделирования процессов листовой штамповки AutoForm. При построении модели в AutoForm инструменты приняты абсолютно жесткими, трение постоянно по всей поверхности детали, коэффициент трения принят равным 0,1, скорость деформирования постоянна.

Для того чтобы выяснить как отношение коэффициентов вытяжки и отбортовки может повлиять на высоту внутренней или наружной стенки, возьмем кольцо, показанное на рис. 2, с относительной толщиной  $S/D = 0,0192$  и будем увеличивать сначала наружный диаметр кольцевой заготовки, а затем уменьшать диаметр отверстия кольцевой заготовки, меняя таким образом соотношение коэффициентов вытяжки и отбортовки.

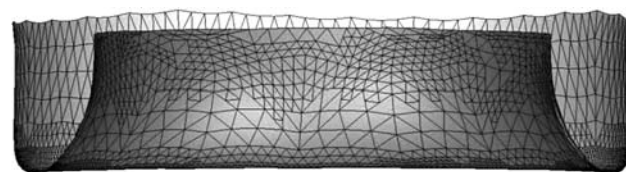


Рис. 3. Разрез детали, полученной при отношении  $k_{отб}/k_{выт} = 1,34$

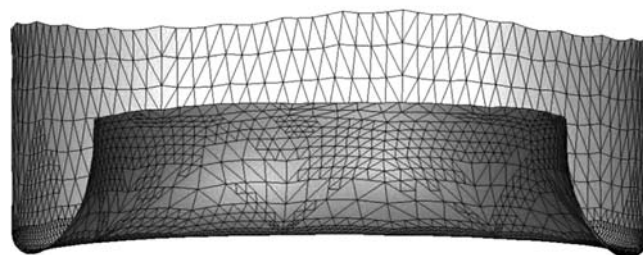


Рис. 4. Разрез детали, полученной при отношении  $k_{отб}/k_{выт} = 1,23$

Коэффициент вытяжки рассчитаем по формуле

$$k_{\text{выт}} = D_{\text{заг}}/D,$$

где  $D_{\text{заг}}$  — диаметр кольцевой заготовки;  $D$  — наружный диаметр профильного кольца.

Коэффициент отбортовки определяем по формуле

$$k_{\text{отб}} = D_{\text{б}}/D_{\text{отв}},$$

где  $D_{\text{б}}$  — внутренний диаметр (диаметр борта) профильного кольца;  $D_{\text{отв}}$  — диаметр отверстия кольцевой заготовки.

Очевидно, что при изменении одного размера кольцевой заготовки одна из стенок должна изменять свою высоту, но при условии отсутствия «перетяжки» высота второй стенки не должна изменяться. Однако моделирование показало, что это условие выполняется не всегда.

Рассмотрим влияние изменения коэффициента вытяжки наружной стенки на высоту стенки внутреннего борта, получаемого отбортовкой. При моделировании установлено, что с увеличением коэффициента вытяжки высота стенки внутреннего борта уменьшается (рис. 3–5) и в определенный момент операция отбортовки прекращает выполняться, происходит только операция вытяжки (рис. 6).

Зависимость относительной высоты внутренней стенки кольца от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки представлена на рис. 7. В качестве относительной высоты борта взято соотношение полученной высоты к высоте исходной детали. В отношении коэффициентов коэффициент отбортовки постоянен.

Как видно на рисунке, при увеличении коэффициента вытяжки до значения, при котором  $k_{\text{отб}}/k_{\text{выт}} = 1,2$ , наблюдается незначительная «перетяжка», высота борта уменьшается не более, чем на 2% по сравнению с исходной. При дальнейшем увеличении коэффициента вытяжки высота борта резко уменьшается, «перетяжка» становится явной, из чего можно сделать вывод о существовании критического отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки.

При проведении моделирования с уменьшенным отверстием заготовки, т. е. с изменением

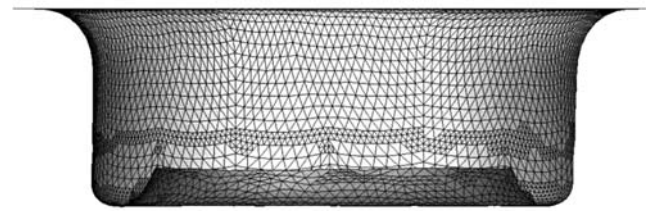


Рис. 5. Разрез детали, полученной при отношении  $k_{\text{отб}}/k_{\text{выт}} = 1,15$

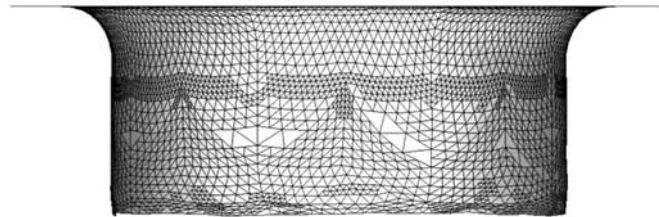


Рис. 6. Разрез детали, полученной при отношении  $k_{\text{отб}}/k_{\text{выт}} = 1,12$

коэффициента отбортовки, высота наружной стенки, получаемой вытяжкой, менялась незначительно, в пределах 2,5% (рис. 8), что говорит об отсутствии «перетяжки» в сторону отбортовки. На рисунке в качестве относительной высоты наружной стенки взято соотношение полученной высоты к высоте исходной детали. В соотношении коэффициентов коэффициент вытяжки неизменен. Дальнейшее увеличение коэффициента отбортовки для выявления возможной критической точки для данного типоразмера ограничено образованием трещин у горловины борта.

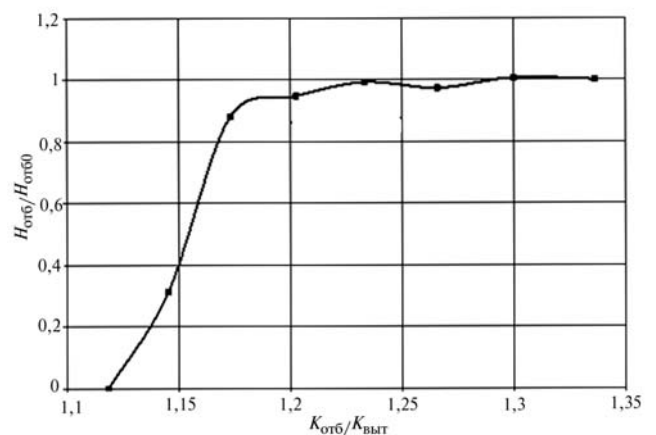


Рис. 7. Зависимость относительной высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки:

■ —  $S_0/D_{\text{нар}} = 0,0192$

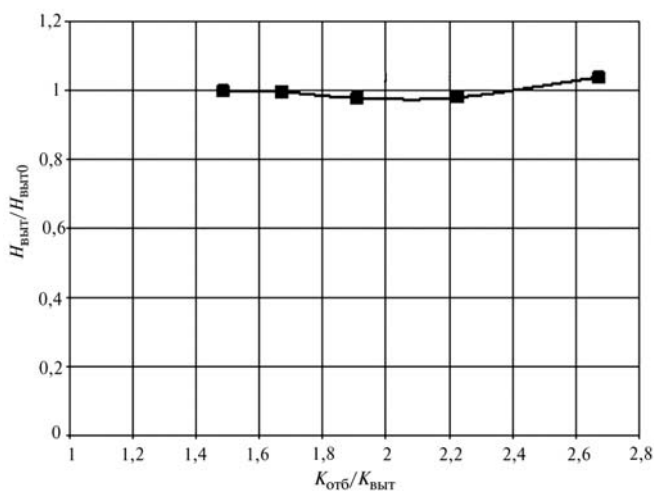


Рис. 8. Зависимость относительной высоты наружной стенки от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки:

■ —  $S_0/D_{нар} = 0,0192$

Для проверки достоверности полученных зависимостей проведено аналогичное моделирование для других типоразмеров профильных колец:

- 1)  $S/D = 0,0118$ ;
- 2)  $S/D = 0,0087$ ;
- 3)  $S/D = 0,0143$ ,

где  $S$  — толщина материала;  $D$  — наружный диаметр кольца; толщина заготовок 2 мм, материал — сталь 08 кп.

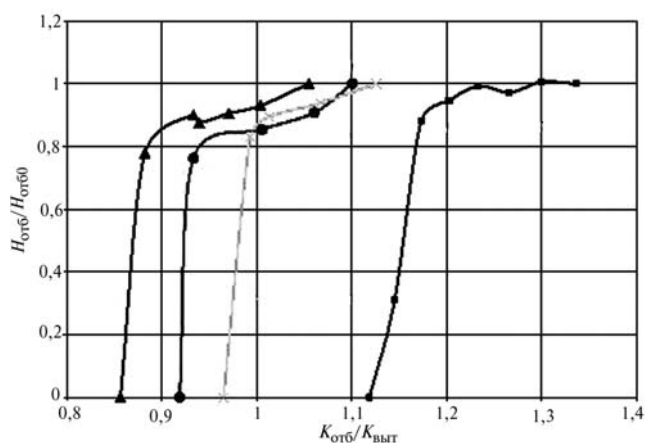


Рис. 9. Зависимости относительной высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных диаметров деталей:

■ —  $S_0/D_{нар} = 0,0192$ ; ● —  $S_0/D_{нар} = 0,0118$ ;  
▲ —  $S_0/D_{нар} = 0,0087$ ; × —  $S_0/D_{нар} = 0,0143$

Зависимости изменения относительной высоты борта от соотношения коэффициентов отбортовки и вытяжки при изменении диаметра отверстия заготовки, т. е. коэффициента отбортовки, показаны на рис. 9.

Из анализа полученных зависимостей следует, что характер изменения относительной высоты борта для разных типоразмеров аналогичен: до определенного момента изменение высоты стенки борта незначительно, но существует некоторое критическое значение отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки, при котором «перетяжка» резко увеличивается и в определенный момент операция отбортовки прекращается выполняться, производится только операция вытяжки. Однако кривые разных типоразмеров смещены друг относительно друга по оси абсцисс. Зависимость критического отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки, после достижения которого происходит «перетяжка», от отношения толщины заготовки к наружному диаметру детали для деталей с толщиной заготовок 2 мм показана на рис. 10.

При изменении диаметра отверстия (коэффициента отбортовки) в процессах штамповки перечисленных выше типоразмеров не прослеживается какой-либо явной закономерности изменения относительной высоты наружной стенки от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки (рис. 11). Однако следует отметить, что «перетяжка» появляется при штамповке деталей с меньшей относительной толщиной.

Как видно на рисунке 11, при штамповке одних деталей колебания высоты наружной стенки незначительны, в то время как при

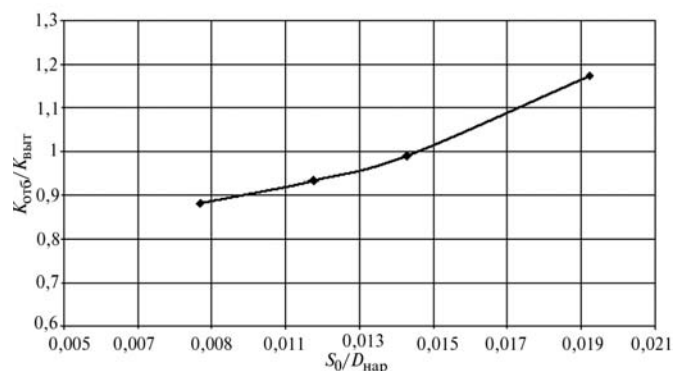


Рис. 10. Зависимость критического соотношения коэффициентов от относительной толщины

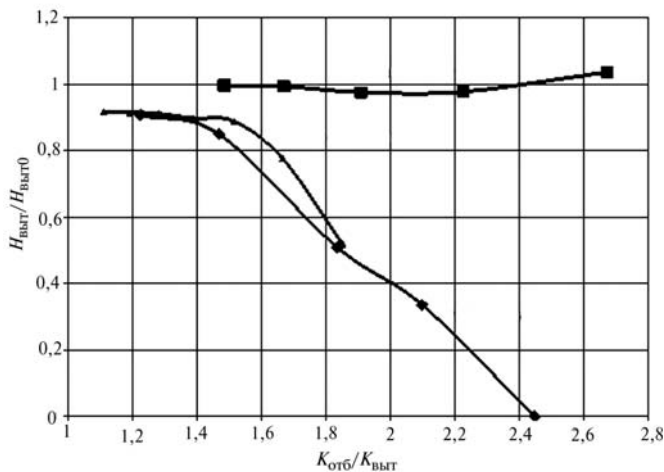


Рис. 11. Зависимость высоты наружной стенки от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных диаметров деталей:

■ —  $S_0/D_{нар} = 0,0192$ ; ◆ —  $S_0/D_{нар} = 0,0098$ ;  
▲ —  $S_0/D_{нар} = 0,0087$

штамповке других деталей операция вытяжки полностью перестает выполняться и наружная стенка в конечной детали отсутствует (рис. 12).

Интересен тот факт, что заготовки для разных типоразмеров при увеличении коэффициента отбортовки ведут себя по-разному: при штамповке деталей с относительной толщиной  $S_0/D_{нар} = 0,0288$ ;  $0,0192$  материал у горловины внутренней стенки начинает разрушаться, но при этом «перетяжка» не появляется, при штамповке деталей с  $S_0/D_{нар} = 0,0096$ ;  $0,0098$ ;  $0,0087$  наружная стенка полностью «перетекает» во внутреннюю, а отбортовка при этом не производится до конца и разрушения материала не происходит.

Для типоразмера кольца, представленного на рис. 2, проведено также исследование зависимости изменения высоты наружной/внутренней стенки в зависимости от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки с использованием другой толщины заготовки (рассмотрены толщины 1 мм, 2 мм и 3 мм)

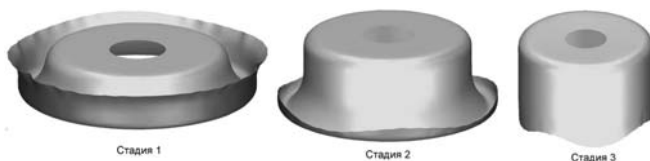


Рис. 12. Деталь с относительной толщиной  $S_0/D_{нар} = 0,0096$

и материала заготовки (рассмотрены материалы 08КП, АМг3 и 08Х18Н10).

Характер зависимости изменения высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных толщин аналогичен характеру кривых, показанных на рис. 9: также имеется некоторое критическое соотношение коэффициентов (свое для каждого из графиков), при котором начинается заметная «перетяжка», но при этом кривые смещены друг относительно друга по оси абсцисс (рис. 13).

При изменении коэффициента отбортовки при варьировании толщиной заготовки явной закономерности также не наблюдается: в разных случаях колебания высоты наружной стенки то незначительны, то достигают максимально возможного значения, когда наружная стенка в конечной детали отсутствует (рис. 14). При изменении толщины «перетяжка» наблюдается при наименьшей толщине заготовки.

Характер зависимости изменения высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных материалов аналогичен характеру кривых, показанных на рис. 9: существует некоторое критическое отношение коэффициентов, при котором начинается заметная «перетяжка», но при этом графики смещены друг относительно друга по оси абсцисс (рис. 15).

Изменения высоты наружной стенки при варьировании коэффициента отбортовки для

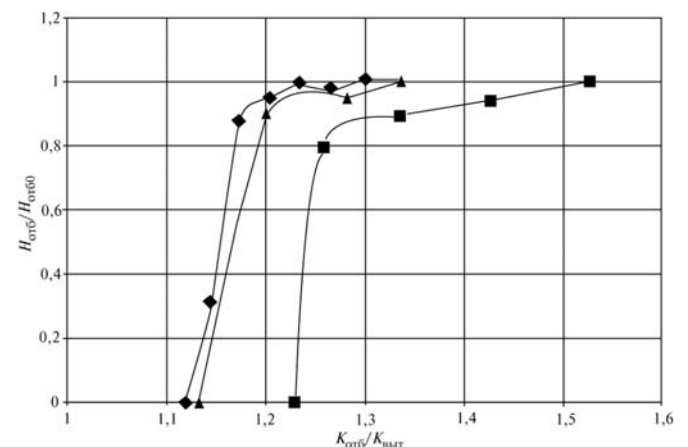


Рис. 13. Зависимость относительной высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных толщин листа:

◆ — 2 мм; ■ — 3 мм; ▲ — 1 мм

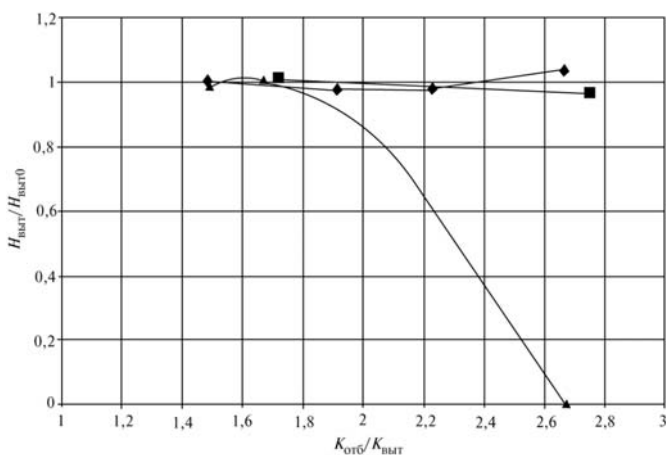


Рис. 14. Зависимость относительной высоты наружной стенки от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных толщин листа:

◆ — 2 мм; ■ — 3 мм; ▲ — 1 мм

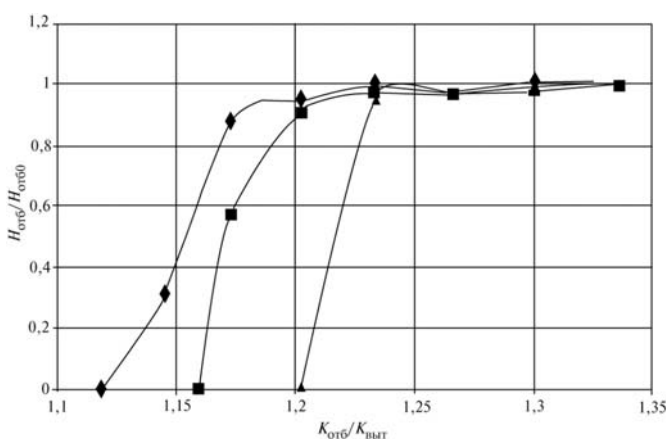


Рис. 15. Зависимость относительной высоты борта от отношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных материалов:

◆ — сталь 0,8 кл; ■ — сталь 0,8X18N10;  
▲ — алюминий АмГ3

всех используемых материалов колеблются в небольшом диапазоне, т. е. можно принять, что «перетяжка» в сторону отбортовки для детали с относительной толщиной 0,0192 отсутствует при использовании любого материала.

Наблюдая за течением процесса в программе AutoForm, следует обратить внимание, что для процессов, в которых имеет место «перетяжка» возможны два варианта ее проявления:

1) перетяжка появляется в самом начале процесса до образования стенок, преобладающий процесс определяется в начальные моменты штамповки и иногда второй процесс даже не успевает начаться;

2) образование «перетяжки» уже после образования стенок. При этом бывают случаи, когда образуется, например, внутренняя стенка значительной высоты, которая затем в ходе процесса полностью перетягивается в наружную стенку. Распределение вариантов «перетяжки» в зависимости от относительной толщины и отношения коэффициентов показано на рис. 16.

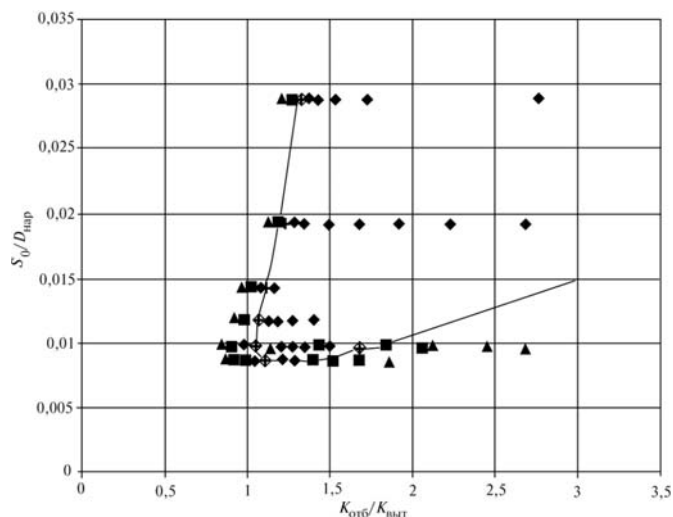


Рис. 16. Распределение вариантов «перетяжки»:

◆ — перетяжка отсутствует; ■ — фиксированная высота стенки; ▲ — перетекание металла из стенки; + — границная линия

На рисунке 16 показана линия, ограничивающая область пар значений относительной толщины и отношения коэффициентов, при которых процесс вытяжки и отбортовки стабилен и не требует применения конструктивных элементов в штампе, защищающих процесс от «перетяжки». Значения, расположенные вблизи границы, находятся в «зоне риска» и требуют предварительной проверки в виде моделирования или физического эксперимента.

## Выводы

1. В совмещенном процессе вытяжки и отбортовки «перетяжка» в сторону вытяжки появляется при уменьшении значений отношений коэффициентов  $k_{отб}/k_{выт}$ . Значение критического отношения коэффициентов, после достижения которого происходит «перетяжка», увеличивается с ростом относительной толщины детали.

2. В совмещенном процессе вытяжки и отбортовки «перетяжка» в сторону отбортовки появляется при увеличении значений отношений коэффициентов  $k_{отб}/k_{выт}$  для деталей с относительной толщиной  $S_0/D_{нар} = 0,0096$ ;

$0,0098$ ;  $0,0087$ . При штамповке деталей с  $S_0/D_{нар} = 0,0288$ ;  $0,0192$  «перетяжка» не появляется.

## Литература

1. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
3. Петрушина М.М., Езжев А.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки профильных колец воздухоочистительного аппарата // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Вып. 7. 2008. <http://technomag.edu.ru/doc/98224.html>. № 0420800025\0043.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012