

УДК 621.7.044

Фролов Е. А.  
Ясько С. Г.  
Кравченко С. И.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫТЯЖКОЙ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Важной проблемой пластического формообразования листового металла является устойчивость процесса деформирования, являющаяся одним из основных условий получения штампованных деталей высокого качества. Потеря устойчивости формообразования приводит к возникновению значительных местных деформаций, разрушению металла или искажению формы детали [1–3]. Особенно это проявляется при высокоскоростном деформировании тонколистовых заготовок [4, 5].

Целью работы является определение параметров деформирования при высокоскоростной вытяжке осесимметричных тонколистовых заготовок, обеспечивающих формообразование деталей без искажения формы рельефа и разрушения металла методом пневмоударной штамповки (ПУШ).

Листовая заготовка малой толщины при вытяжке может получить следующие типы потери устойчивости: волнистость (образование складок), неравномерность вытяжки фланца, наличие вмятин на купольной части и сосредоточенное утонение (см. рис. 1.)



Рис. 1. Отштампованные тонколистовые детали с различными типами потери устойчивости при пневмоударной штамповке жидкостью

Проявление того или иного типа потери устойчивости зависит от напряженного состояния, скорости деформирования, анизотропии, механических свойств материала и других факторов.

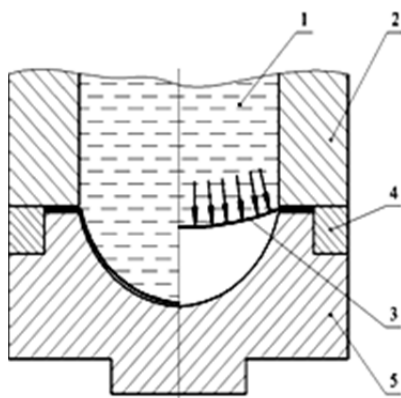


Рис. 2. Типовая схема вытяжки деталей жидкостью со сферическим дном

Потеря устойчивости наиболее вероятна при получении деталей из тонких заготовок с использованием высокоскоростного локального нагружения. В этом отношении наиболее характерен процесс вытяжки часто встречающихся куполообразных деталей со сферическим и эллиптическим дном.

В процессе вытяжки (рис. 2) тонколистовая заготовка 3, уложенная в трафаретное кольцо 4, зажимается между прижимным кольцом 2 и матрицей 5 и вытягивается жидкостью 1 в матрицу. При вытяжке зажатой оказывается только часть заготовки в виде кольца, остальная часть остается свободной. Чем больше свободная поверхность заготовки (между пуансоном и матрицей), тем больше вероятность потери устойчивости за счет сжимающих напряжений на данном участке с образованием складок. Для предотвращения образования складок прибегают к увеличению

радиальных растягивающих напряжений, что достигается увеличением трения между прижимом и фланцем заготовки за счет урегулирования усилия прижима, использованием тормозных ребер или изменением обратного (реверсивного) способа вытяжки. Увеличение трения между прижимом и фланцем сопровождается увеличением деформирующего усилия и соответственно растягивающих напряжений в опасном сечении заготовки, что может привести к появлению сосредоточенного утонения, разрывов и другим видам потери устойчивости.

Теоретически устойчивость заготовки может быть рассмотрена с использованием энергетического метода [6], согласно которому устойчивое состояние заготовки характеризуется условием  $U \geq A$ , где  $U$  – работа внутренних сил, препятствующая потере устойчивости;  $A$  – работа внешних сил на контуре элемента.

Решая совместно уравнения для работы внешних и внутренних сил, установлено [6], что, исходя из критического напряжения устойчивости, можно найти предельное значение относительной толщины заготовки при вытяжке деталей со сферическим дном:

$$\left( \frac{S}{D_{з.пр}} \right) = 0,11 \sqrt{\frac{S}{R_{сф}}}, \quad (1)$$

где  $R_{сф}$  – радиус сферы дна;  $S$  – толщина заготовки.

Определение предельных размеров заготовки  $D_{з.пр}$  для вытяжки сферических днищ при минимальном усилии прижима, достаточном для удержания складкообразования фланца,  $q_0 = 0,016\tau$  можно выполнять по более простой зависимости:

$$\frac{S}{D_{з.пр}} \cdot 100\% \geq 0,57 \quad (2)$$

Если увеличить усилие прижима до  $0,02\sigma_m$ , то относительную толщину заготовки можно уменьшать, при этом утонение, хотя оно и увеличивается, не будет превышать допустимую величину 15 %. В этом случае для сферических днищ:

$$\frac{S}{D_{з.пр}} \cdot 100\% \geq 0,485. \quad (3)$$

Таким образом, можно считать, что предельно допустимая относительная толщина заготовки при вытяжке полусферических днищ с плоским прижимом равна 0,45–0,50 %.

Вытяжка с плоским прижимом на пневмоударной установке Т-1324 позволяет использовать заготовки без потери устойчивости с меньшей относительной толщиной, чем в штампе. Так, за одну операцию без специальных конструктивных мероприятий и промежуточных отжигов вытягивалась деталь «полусфера» (рис. 3), при коэффициенте вытяжки  $k = 1,69$  и относительной толщине заготовки 0,42 %, что в три раза меньше расчетной – при вытяжке пуансоном по зависимости (1) и в 1,1–1,2 раза меньше предельной – при вытяжке с большим усилием прижима.



Рис. 3. Цилиндрическое днище

Также на установке Т-1324 пневмоударной вытяжкой получены сферические днища диаметром до 440 мм при относительной толщине 0,23 %, что в 4,15 раза меньше расчетной при коэффициенте вытяжки  $k = 1,55$  за одну операцию и в 1,9–2,2 раза меньше предельной.

Таблица 1

Характеристики полученных ПУШ деталей со сферическим дном

Толщина $S$ , мм	Диаметр $D_3$ , мм	Материал	Относительная толщина $S/D_3$ 100%	Допустимая расчетная толщина $S/D_3 \cdot 100\%_{\text{расч}}$	Предельная относительная толщина $S/D_3 \cdot 100\%_{\text{расч}}$
1,5	650	X18H9T	0,23	0,91	0,455–0,5 J
0,8	189	Сталь 10кп	0,42	1,29	0,455–0,5
0,8	380	X18H10T	0,31	0,89	0,455–0,5
1,5	450	Ст.3	0,33	0,82	0,44–0,5

Коэффициенты вытяжки соответственно равны 1,78 и 1,38, а относительные толщины – 0,31 и 0,33 %, что в 4,2 и 2,5 раза меньше расчетной для вытяжки пуансоном и в 2,06–2,38 и 1,38–1,51 раза меньше предельно допустимой.

При ПУШ штамповке прижим может осуществляться за счет применения неподвижной прижимной плиты, зафиксированной в период деформирования на постоянном расстоянии, несколько большем толщины исходной заготовки, обычно в 1,1–1,2 раза. Величина гарантированного зазора принимается минимальной при конструктивном фланце и приближается к максимальному значению при удаляемом технологическом фланце. При необходимости в каждом конкретном случае значение зазора уточняется экспериментально с целью обеспечения требуемого качества штампуемых деталей.

Величина усилия прижима может быть рассчитана исходя из удельного усилия прижима. Если приведенную в работе [7] формулу преобразовать так, чтобы удельное усилие прижима зависело от относительной толщины заготовки и коэффициента вытяжки, то она примет вид:

$$q = 0,0025 \left[ (k-1)^2 + \frac{1}{2k \frac{S}{D_3} \cdot 100} \right] \cdot \sigma_{\sigma} \quad (4)$$

Значения удельных усилий для каждого конкретного случая могут быть рассчитаны по выражению  $q = q_{06B}$ , где  $q_0$  – удельное усилие прижима для материала с единичным пределом прочности, а также может быть определено из графика, приведенного на рис. 4.

Основываясь на результатах вытяжки на установке Т-1324 полусферических и близких к ним по форме днищ, можно сделать вывод, что ПУШ позволяет вытягивать куполообразные детали без применения перетяжных порогов, двухпереходной штамповки и других специальных приемов с относительной толщиной заготовки в два – четыре раза меньше (табл. 2), чем допускается при вытяжке пуансоном.

Таблица 2

Технологические возможности ПУШ вытяжкой на установке Т-1324

Отношение $\frac{S/D_3 \cdot 100\%_{\text{расч}}}{S/D_3 \cdot 100\%}$	Отношение $\frac{S/D_3 \cdot 100\%_{\text{нр}}}{S/D_3 \cdot 100\%}$	Коэффициент вытяжки $D_3/d$	Вид прижима
3,95	1,98–2,17	1,69	Прижим на заготовку
3,08	1,08–1,18	1,69	То же
4,23	2,06–2,38	1,78	Фиксированный зазор 0,95 мм
2,50	1,38–1,51	1,38	Прижим на заготовку

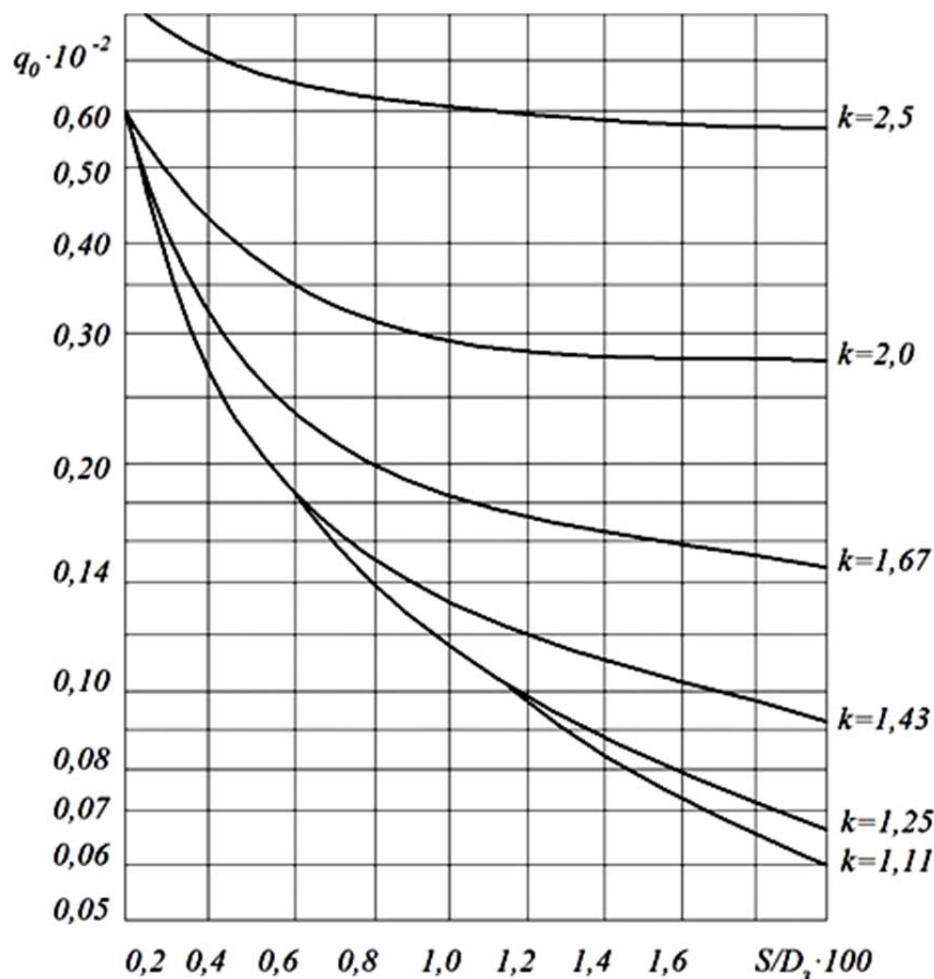


Рис. 4. Зависимость удельного усилия прижима от относительной толщины заготовки для материала с единичным пределом прочности

Если расчет предельной относительной толщины заготовки проводится с использованием зависимости, выведенной в работе [6] для вытяжки пуансоном, то применительно к ПУШ вытяжкой, как показали эксперименты, коэффициент в зависимости (1) может быть уменьшен в четыре раза:

$$\left( \frac{S}{D_3} \right)_{пр} = 0,0,027 \sqrt{\frac{S}{R_{сф}}} \quad (5)$$

Учитывая, что условия устойчивости заготовки при формовке осесимметричных элементов несферической формы примерно подобны условиям устойчивости заготовки при формовке сферических элементов, полученные результаты можно распространить и на вытяжку эллиптических, неглубоких конических и других близких к ним по форме деталей (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид детали типа «обтекатель»

Исследования показали, что при ПУШ вытяжкой увеличение радиуса перетяжного ребра матрицы положительно сказывается до величины  $R_m = 10S$ .

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлены технологические возможности изготовления качественных осесимметричных тонкостенных деталей методом ПУШ вытяжкой.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головлев В. Д. *Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла)* / В. Д. Головлев. – М. : Машиностроение, 1974. – 136 с.
2. Пановко Я. Г. *Устойчивость и колебание упругих систем* / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – М. : Наука, 1967. – 280 с.
3. Матвеев А. Д. *Испытание листового металла на осесимметричное растяжение* / А. Д. Матвеев // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – М 10. – С. 14–17.*
4. Орченко Л. П. *Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках* / Л. П. Орленка. – М. : Машиностроение, 1964. – 167 с.
5. Фролов Е. А. *Аналитическое исследование параметров точности вытяжных операций пневмударной штамповки* / Е. А. Фролов, И. В. Манаенков, О. Г. Носенко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – Вып. 62. – С. 62–70.*
6. Мошин Е. Н. *Технология штамповки крупногабаритных деталей* / Е. Н. Мошин. – М. : Машиностроение, 1973. – 240 с.
7. Скворцов Г. Д. *Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки : конструкции и расчеты* / Г. Д. Скворцов. – М. : Машиностроение, 1972. – 360 с.

## REFERENCES

1. Golovlev V. D. *Raschety processov listovoj shtampovki (Ustojchivost' formoobrazovanija tonkolistovogo metalla)* / V. D. Golovlev. – M. : Mashinostroenie, 1974. – 136 s.
2. Panovko Ja. G. *Ustojchivost' i kolebanie uprugih sistem* / Ja. G. Panovko, I. I. Gubanova. – M. : Nauka, 1967. – 280 s.
3. Matveev A. D. *Ispytanie listovogo metalla na osesimmetrichnoe rastjazhenie* / A. D. Matveev // *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. – 1971. – M 10. – S. 14–17.*
4. Orchenko L. P. *Povedenie materialov pri intensivnyh dinamicheskie nagruzkah* / L. P. Orlenka. – M. : Mashinostroenie, 1964. – 167 s.
5. Frolov E. A. *Analiticheskoe issledovanie parametrov tochnosti vytyazhnyh operacij pnevmoudarnoj shtampovki* / E. A. Frolov, I. V. Manaenkov, O. G. Nosenko // *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii. – 2013. – Вып. 62. – С. 62–70.*
6. Moshnin E. N. *Tehnologija shtampovki krupnogabaritnyh detalej* / E. N. Moshnin. – M. : Mashinostroenie, 1973. – 240 s.
7. Skvorcov G. D. *Osnovy konstruirovaniya shtampov dlja holodnoj listovoj shtampovki : konstrukcii i raschety* / G. D. Skvorcov. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 360 s.

Фролов Е. А. – д-р техн. наук, проф. ПолтНТУ;

Ясько С. Г. – ст. преп. ПолтНТУ;

Кравченко С. І. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. ПолтНТУ.

ПолтНТУ – Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава.

E-mail: frolov.poltntu@gmail.com; s.g.yasko@gmail.com; 050Ser09@i.ua