

УДК 621.984

**В. В. КУХАРЬ**, докт. техн. наук, проф., Приазовский ГТУ, Мариуполь;  
**В. Н. ПАВЛЕНКО**, докт. техн. наук, доц., НАУ «ХАИ», Харьков;  
**О. Г. НОСЕНКО**, аспирант, ПНТУ, Полтава.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГИДРОФОРМОВКЕ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ

В статье исследованы технологические возможности операции листовой штамповки-гидроформовки подвижными средами: получены зависимости, которые с достаточной степенью точности позволяют определять высоту деталей типа днищ при изготовлении их формовкой жидкостью или эластичной средой. Практическое использование результатов работы позволит оптимизировать процесс формоизменения деталей такого типа.

**Ключевые слова:** технология, штамповка, лист, жидкость, эластичная среда, формовка, возможности, деформирование.

**Введение.** При производстве деталей различного назначения и, в частности, при изготовлении деталей типа днищ из листа широкое применение нашла формовка подвижными средами, т.е. формообразование деталей без перемещения фланца заготовки давлением жидкости или эластичной средой, как в статическом, так и динамическом режимах деформирования. По сравнению со штамповкой в инструментальных штампах штамповка подвижными средами имеет следующие достоинства: отсутствие жёсткого пуансона, повышение точности и чистоты обрабатываемых деталей, увеличение предельных технологических возможностей штампуемых материалов и высокую стабильность и повторяемость технологических результатов. В существующих литературных источниках по технологии обработки металлов давлением недостаточно сведений по технологическим процессам формовки подвижными средами (жидкость или эластичная среда) при скоростных процессах деформирования [1–4].

**Цель данного исследования** – установить предельно допустимые высоты деталей типа днищ, получаемых при динамической гидроформовке и определить наиболее рациональные схемы нагружения и максимальные степени деформирования штампуемых заготовок.

Известно, что возможности процесса как статической, так и динамической гидроформовки ограничиваются разрушением заготовки в местах, где достигнута на данной стадии деформирования наибольшая интенсивность напряжений и получено наибольшее утонение стенки. При штамповке днищ со сферической поверхностью местом разрушения заготовки обычно является полюс заготовки, причём разрушение происходит при достижении некоторой критической интенсивности напряжений  $\sigma_1 = \sigma_{ik}$  и соответствующей ей критической интенсивности деформаций  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{ik}$ .

Используя уравнение связи напряжений и деформаций в виде  $\nu_\sigma = \nu_\varepsilon$ , т.е.

$$\frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2 \cdot \varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – тангенциальные, меридиональные напряжения и напряжения по толщине стенки;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , – тангенциальные, меридиональные деформации и деформации по толщине стенки, и условие постоянства объёма  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ , после преобразований получим

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3} \quad (2)$$

Интенсивность деформации и максимальная по абсолютной величине деформация связаны между собой соотношением [1]:

$$\varepsilon_i = \beta |\varepsilon_{max}| = \beta |\varepsilon_3| \quad (3)$$

где  $\beta = \frac{2}{\sqrt{3+\nu_\sigma^2}}$ , а с учётом (3) можно записать

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \frac{\varepsilon_{ik}(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)}{\beta(\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3)} \quad (4)$$

Величина критической интенсивности деформации, которая достигается к моменту разрушения, зависит от схемы напряжённого состояния деформируемой заготовки. На основе данных, приведенных в работах [2] и [3], связь между критической интенсивностью деформаций и схемой напряжённого состояния с использованием коэффициента жёсткости  $D$ , предложенного Г.А. Смирновым-Аляевым, может быть записана в виде

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{il,p} (2,5 - 2D + 0,5D^2), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{il,p}$  – интенсивность деформации в момент разрушения образца при испытаниях на линейное растяжение;  $D = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 / \sigma_i$ .

Если принять  $\varepsilon_{il,p} = \beta \delta_k$ , где  $\delta_k$  – удлинение, получаемое в середине шейки образца, то с учётом (5) зависимость (4) для момента разрушения примет вид

$$\varepsilon_{2max} = \delta_k (2,5 - 2D + 0,5D^2) \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3} \quad (6)$$

При штамповке деталей типа днищ характер изменения меридиональных деформаций  $\varepsilon_2$  вдоль образующей – не линейный. На основе обработки экспериментальных данных установлено, что средняя величина меридиональной деформации может быть принята равной примерно  $0,75 \varepsilon_{2max}$ . В то же время величина средней относительной деформации  $\varepsilon_{2cp}$  может быть определена с помощью соотношения

$$\varepsilon_{2cp} = \frac{L-d}{d} \quad (7)$$

где  $L$  – длина образующей днища (длина дуги);  
 $d$  – диаметр днища.

Используя зависимость  $L = \sqrt{d^2 + \frac{16}{3}h^2}$ , где  $h$  – высота днища, можно получить после преобразования выражения для определения относительной высоты днища  $h/d$ , которая может быть получена к моменту разрушения:

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{3}{16}[(1 + \varepsilon_{2cp})^2 - 1]}.$$

В случае гидроформовки сферического днища, когда в полюсе детали  $\sigma_1 = \sigma_2$ ,  $\sigma_3 \approx 0$ ,  $D = 2$ , зависимость (8) примет вид

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{3}{16}[(1 + 0,187\delta_k)^2 - 1]}.$$

Величина относительной высоты сферического днища, как это видно из (9), определяется прежде всего удлинением в середине шейки при испытании плоского стандартного образца на линейное разрушение. Характер зависимости  $h/d$  от  $\delta_k$  показан на рисунке.

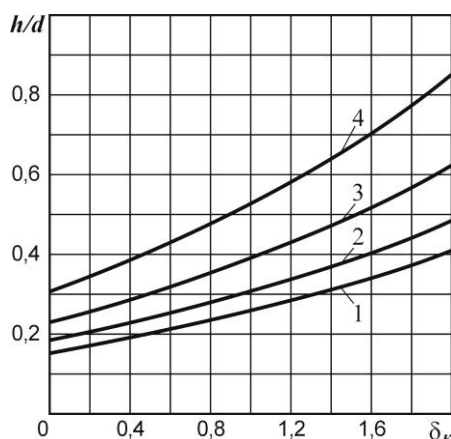


Рис. – Влияние различных факторов на максимальную относительную высоту деталей при гидроформовке:

$$1 - \sigma_3 = 0; 2 - \sigma_3 = 0; 3 - \varepsilon_{2cp} = \varepsilon_{2max};$$

$$3 - \sigma_3 = -0,5\sigma_1; 4 - \sigma_3 = -\sigma_1$$

Одним из способов интенсификации процессов гидроформовки является создание противодействия в процессе деформирования. Создание сжимающих напряжений по толщине заготовки даёт возможность увеличить критическую интенсивность деформаций и получить более глубокие детали. Однако этот способ интенсификации процесса увеличивает перепад толщины вдоль образующей детали, делая его в ряде случаев недопустимо большим. Предельные возможности данного способа интенсификации могут быть определены, если предположить, что в полюсе заготовки  $|\varepsilon_3| = \frac{s_0 - S}{s_0} = 1$ . Тогда из (6) получим

$$D_{np} = 2 - \sqrt{\frac{2}{\delta_k} - 1}$$

Другим способом интенсификации процесса гидроформовки является штамповка с дополнительным нагружением периферийных частей заготовки с целью уменьшения перепада толщины стенки вдоль образующей и более использования способности к деформированию периферийных частей. Дополнительное нагружение может быть осуществлено за счёт создания сил, направленных к полюсу путём создания переменного давления жидкости вдоль образующей или иными способами. Предельные возможности данного способа интенсификации можно определить из (8), если предположить, что  $\varepsilon_{2cp} = \varepsilon_{2max}$  (см. рис.).

Наибольшего увеличения возможностей формоизменения при минимальном перепаде толщины можно также достичь, если переменное нагружение заготовки вдоль образующей сочетать с созданием противодействия и скоростного деформирования материала заготовки.

Экспериментальные исследования выполнялись на установке для пневмоударной статикодинамической штамповки жидкостью модели Т-1324, которая позволяла вести деформирование заготовки как при равномерном распределении давления жидкости вдоль образующей заготовки, так и при переменном распределении давления жидкости вдоль образующей, а также при различных скоростях формообразования.

Сопоставление результатов выполненных экспериментов без создания перепада давлений, а также приведенных в работе [3], с расчётными значениями максимальной относительной высоты днищ, которые были получены с использованием значений  $\delta_k$  из работы [5], показывает удовлетворительную их сходимость (таблица).

Таблица. Сопоставление результатов экспериментов с расчётными значениями максимальной относительной высоты днищ

относительная высота днища	Материал					
	АМг6М	Д16М	АМг3М	Ст20	12Х18Н10Т	АМцАМ
$h/d$ (эксперимент, статика)	0,190	0,220	0,200	0,260	0,340	0,280
$h/d$ (расчёт)	0,182	0,216	0,195	0,275	0,308	0,268
$h/d$ (эксперимент, статика)	0,185	0,222	0,198	0,275	0,315	0,27

Экспериментальные исследования по гидроформовке переменным давлением жидкости показали возможность уменьшения перепада толщины штампуемой детали за счёт дополнительного нагружения периферийных зон заготовки и скоростного деформирования. Это позволило увеличить возможности штампуемость материалов при операциях формовки типа днищ различной конфигурации формы и рельефа. Например, для получения практически постоянной толщины стенки на расстоянии от центра заготовки,

равном 0,7...0,8 радиуса детали, относительная высота деталей из АМгбМ возросла до  $h/d = 0,21$ , а деталей из АМцАМ – до  $h/d = 0,30$ . Соответствующие расчётные значения  $h/d$  составляют 0,20 и 0,291.

**Выводы.** Полученные зависимости позволяют с достаточной степенью точности определять предельно допустимую высоту деталей типа днищ при изготовлении их статической и динамической гидроформовкой как без дополнительного силового воздействия на заготовку в процессе штамповки, так и при дополнительном силовом воздействии. При этом наиболее целесообразным является дополнительное нагружение периферийных частей заготовки с помощью переменного давления жидкости, применением накладок и др., позволяющее не только увеличить предельно допустимую высоту деталей, но и уменьшить их разнотолщинность.

**Список литературы:** 1. *Сторожев М. В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с. 2. *Смирнов-Аляев Г.А.* Механические основы пластической обработки металлов. – Л.:Машиностроение,1968.- 272с. 3. *Исаченков Е.И.* Штамповка резиной и жидкостью – М: Машиностроение, 1997.–368с.; 4. *Фролов Е.А., Мовшович А.Я.,* Ударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных деталей упругими средами. Монография. 5. *Глазков В.И., Ершов В.И. Медведев Ю.Р.* Расчётное определение относительного удлинения поперечного сужения плоских образцов.– Заводская лаборатория. 1980,№2. с. 160-161.

*Надійшла до редколегії 30.10.2013*

УДК 621. 984

**Технологические возможности формообразования при гидроформовке подвижными средами // Кухарь В. В., Павленко В. Н., Носенко О. Г. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків, НТУ «ХП». – 2013. – № 42 (1015). – С. 115–119. Бібліогр.: 5 назв.**

У статті досліджені технологічні можливості операції листового штампування-гідроформовки рухомими середовищами: отримані залежності, які з достатнім ступенем точності дозволяють визначати висоту деталей типу днищ при виготовленні їх формовкою рідиною або еластичною середовищем. Практичне використання результатів роботи дозволить оптимізувати процес формозміни деталей такого типу.

**Ключові слова:** технологія, штампування, лист, рідина, еластичне середовище, формовка, можливості, деформування.

In this article explored the technological capabilities of sheet metal forming operations, hydroformed mobile environments: the dependences that with a sufficient degree of accuracy possible to determine the height of parts such as the bottoms of the manufacture of forming a liquid or elastic medium. The practical use of work will optimize the process of forming part of this type.

**Keywords:** technology, stamping, plate, liquid, elastic, forming, opportunities, deforming.

УДК. 621. 771. 01

**О. П. МАКСИМЕНКО**, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, Днепродзержинск;  
**Д. И. ЛОБОЙКО**, аспирантка, ДГТУ, Днепродзержинск.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЙ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

В статье проанализировано влияние различных значений удельных натяжений на устойчивость процесса прокатки и на энергозатраты на примере производства листа 3х1400 мм, по существующему