

для стали Ст3. Большой износ обусловлен малой толщиной электрода-инструмента.

**Список литературы:** 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин Вихрегоковый контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с. 2. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов: Учебное пособие / Калинингр. ун-т – Калининград, 2000. – 448 с. 3. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.С. Гаврилюк и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с. 4. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: КНЦ, 2002. – 324 с. 5. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – Апатиты: КНЦ, 1995. – 276 с. 6. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. – 189 с.; Барнаул: изд. АГТУ, 2000 (изд. 2-ое переработанное и дополненное). – 160 с. 7. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 164 с. 8. Фатеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с. 9. Е.М. Левинсон, В.С. Лев. Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: ЛЕНИЗДАТ, 1972. – 328 с. 10. А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосненко. Электроимпульсная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 296 с. 11. Отто М.Ш., Коренблюм М.В. Транзисторные генераторы для питания электроэрозионных станков. – М., НИИМАШ, 1968. – 68 с. 12. Володин В.Я. Современные сварочные аппараты своими руками. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 304 с. 13. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.

Поступила в редакцию 15.05.2014

УДК 621.919:621.7.044

**Е. А. ФРОЛОВ**, докт. техн. наук, проф., ПолтНТУ, Полтава;  
**С. И. КРАВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ПолтНТУ;  
**О. Г. НОСЕНКО**, аспирант, ПолтНТУ;  
**С. Г. ЯСЬКО**, аспирант, ПолтНТУ

### **ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЫТЯЖКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКЕ ЖИДКОСТЬЮ**

Рассмотрены, а также аналитически и экспериментально исследованы пути повышения степени вытяжки тонколистовых деталей методом пневмоударной штамповки жидкостью. Получены зависимости, позволяющие проектировать технологический процесс высокоскоростной штамповки тонкостенных деталей за счет искусственного регулирования величин протяжных ребер формообразующих матриц на пневмоударном оборудовании модели Т1324 штамповки жидкостью.

**Ключевые слова:** высокоскоростная вытяжка, степень вытяжки, пневмоударная штамповка жидкостью, тонколистовые детали, технологический процесс.

**Постановка проблемы.** Характерной особенностью технологических операций тонколистового формообразования является ограничение возможностей процессов предельными деформациями. Особенно это касается операции высокоскоростной вытяжки [1]. Ограничения в данном случае с одной стороны связаны с исчерпанием пластичности металла и нарушением

условий устойчивости пластического деформирования, а с другой стороны – за счет высокой скорости формообразования, приводящей к локальным чрезмерным утонениям стенки детали или в некоторых случаях к полному разрушению заготовки [2].

**Целью работы** является определение зависимостей, позволяющих интенсифицировать технологический процесс динамической штамповки тонкостенных деталей вытяжкой подвижными средами.

**Изложение основного материала исследований.** Для тонколистовой штамповки деталей с гибкостью  $\lambda = d/s > 200$  ( $d, s$  – диаметр и толщина стенки изделия) характерны утонения стенок, достигающие 30...40 % исходной толщины материала, и наличие гофров на поверхности отштампованных деталей [2, 3].

Для оценки возможности увеличения степени вытяжки фланца и уменьшения утонения проанализируем условия вытяжки заготовки.

Как известно [2], перемещение материала при высокоскоростной штамповке можно разбить на два этапа: перемещение в период разгона и в период торможения.

Эксперименты показывают, что окончание периода разгона фланца при тонколистовой штамповке совпадает с оформлением заготовки в пространственный полуфабрикат, глубина проштамповки которого линейно зависит от величины радиуса закругления протяжного ребра матрицы  $\rho$ . Если величина радиуса закругления меньше оптимальной, то дальнейшая доштамповка полуфабриката осуществляется за счет преобладающего растяжения материала донной части заготовки.

Для оценки кинематических условий вытяжки фланца можно воспользоваться уравнением

$$\frac{Mv^2}{2} = k\pi \cdot d_0 \sigma_{\delta} s l e + \frac{M_{\delta} v_{\delta}^2}{2}, \quad (1)$$

где  $M, M_{\phi}$  – соответственно масса донной части и фланца;

$v, v_{\phi}$  – скорости перемещения донной части и фланца;

$\sigma_{\tau}$  – предел текучести штампуемого материала;

$k$  – коэффициент динамичности;

$d_0, s, l$  – соответственно диаметр и толщина стенки детали, длина участка зоны одноосного растяжения;

$e$  – деформация участка зоны.

Кинематическое условие (1) позволяет при известных значениях членов в первой части уравнения определить критические скорости перемещения донной части заготовки  $v$  в любой момент времени. Знание допустимой скорости перемещения донной части позволяет целенаправленно управлять технологическим режимом штамповки: внешней нагрузкой, геометрией матрицы, допустимой глубиной проштамповки  $f_{п.}$

Так как наиболее значима оценка конечного этапа формообразования, то проведем анализ условия вытяжки (1) в период торможения фланца, когда скорость перемещения фланца  $v \rightarrow 0$ . Коэффициент динамичности  $k \approx 1,2-1,4$ , средняя деформация зоны одноосного растяжения, примыкающей к протяжному ребру матрицы,  $e \leq 0,1$ .

Несколько сложнее оценка величины зоны одноосного растяжения. Ее значение можно установить либо экспериментальным путем с помощью скоростной видеосъемки, либо воспользоваться результатом проделанных ниже вычислений.

При определении размеров зоны одноосного растяжения – сжатия примем, что положение каждой точки деформирующейся донной части заготовки может быть описано системой уравнений постоянства объема при пластическом течении и дифференциальных соотношений между скоростями деформаций, записанных в соответствии с известной методикой [3] в сферической системе координат. Так как процесс деформирования осесимметричен, то перекосы и скручивание в тангенциальном направлении отсутствуют. Поэтому тангенциальная составляющая скорости равна  $v_{\phi} = 0$ , сдвиговые скорости деформаций  $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta\phi} = \varepsilon_{\phi r} = 0$ . Также учтем, что перемещения и скорости в направлении радиуса деформирующейся оболочки весьма мало влияют на положение зоны двухосного растяжения, следовательно, можно принять радиальную скорость  $v_r = 0$ . Тогда полная система уравнений упростится:

$$\frac{\partial v_{\theta}}{r \partial \theta} + \frac{v_{\theta}}{r} \operatorname{ctg} \theta = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} - \frac{v_{\theta}}{r} = 0, \quad (3)$$

где  $v_{\theta}$  – меридиальная составляющая вектора скорости;

$r, \theta$  – координаты в сферической системе: радиус и угол, определяющие положение точки в меридиальном сечении.

Система уравнений (2) и (3) имеет смысл только для зоны двухосного растяжения и допускает два решения:

$$v_{\theta} = -r \operatorname{ctg} \theta + C_1 \quad (4)$$

и

$$v_{\theta} = r\theta + C_2 \quad (5)$$

при значениях  $\theta \leq 22^\circ$ . Тогда размер зоны одноосного растяжения – сжатия можно найти:

$$l = r_0 - r_i = r_0 - \frac{r_0^2 + f_i^2}{2f_i} \sin 22^\circ. \quad (6)$$

Учтем, что на этапе торможения скорость перемещения фланца может быть принята  $v_{\text{cp}} = 0$ , а длина  $l \approx 10-15$ .

Тогда после нескольких преобразований уравнения (1) установим, что скорость донной части заготовки (относительно фланца) не должна превосходить

$$v \leq 3 \sqrt{\frac{\sigma_{\delta}}{\lambda \gamma}}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – плотность штампуемого материала.

Выражение (7) показывает, что увеличение габаритов изделия (увеличение гибкости  $\lambda$ ) приводит к необходимости предусматривать мероприятия уменьшения скорости, которая при  $\lambda > 400$  имеет значения  $v \leq 25$  м/с.

Анализ условий (1) и (7) позволяет прийти к выводу, что вытяжка фланца происходит в наиболее оптимальных условиях, когда скорость фланца  $v_{\text{ф}}$  не равна нулю и стремится к значениям  $v$ . Поэтому при импульсной штамповке увеличение степени вытяжки связано с управлением периодом разгона штампуемой заготовки. Одним из решений этой задачи можно считать искусственное увеличение радиуса закругления протяжного ребра матрицы.

На основании проведенных экспериментов по штамповке деталей с гибкостью  $150 < \lambda < 1000$  была выведена полуэмпирическая зависимость относительного радиуса закругления протяжного ребра матрицы  $\bar{\rho} = \frac{\rho}{s}$ :

$$\bar{\rho} = [0,375k_0 - 0,5]\lambda, \quad (8)$$

устанавливающая связь с коэффициентом вытяжки  $k_0 = \frac{D_0}{d}$  ( $D_0$  – диаметр заготовки) и гибкостью  $\lambda$ . График зависимости (8) приведен на рис. 1. Точками показаны значения  $\bar{\rho}$ , совпадающие со значениями, рекомендуемыми практикой листовой штамповки [4].

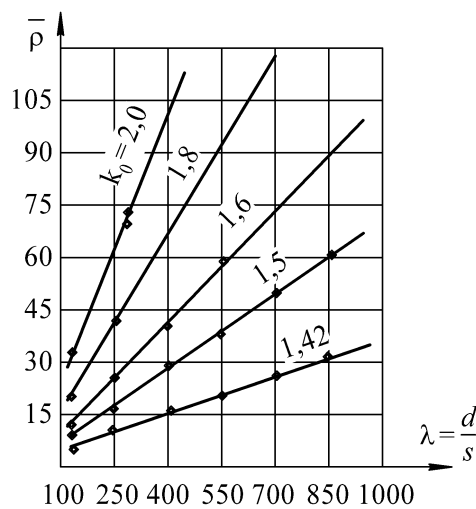


Рис. 1 – Рекомендуемые значения оптимальных радиусов закругления протяжных ребер

График  $\bar{\rho} = f(k_0; \lambda)$  может служить номограммой для определения оптимальных радиусов закругления протяжных ребер при известных значениях начального коэффициента вытяжки  $k_0$  и гибкости  $\lambda$ . Эксперименты показали, что гофры на поверхности, возникающие при штамповке с увеличенными по сравнению с обычно принятыми [4] радиусами закругления, не превышают предельно допустимые значения при их устранении в условиях двухосного растяжения

$$\bar{h} = \frac{h}{b} = 0,1 + \left( \frac{k_0}{k_\phi} \right)^2 (k_0 - 1) \leq 1,2, \quad (9)$$

где  $h$ ,  $b$  – максимальная высота и ширина гофра на поверхности детали;

$k_\phi$  – коэффициент вытяжки фланца;

$k_{\phi} = D_0/D_{\phi}$  ( $D_0, D_{\phi}$  – диаметры заготовки до и после вытяжки).

На рис. 2 показаны детали типа полусфер, отштампованные из листовых заготовок АМцМ и Х18Н9Т толщиной 0,5 мм и диаметром 100 и 300 мм ( $\lambda_1 = 200, \lambda_2 = 600$ ). Утонение отштампованных деталей не превышало 20 %. Глубина штамповки полуфабриката, как показали эксперименты, может находиться по формуле

$$f_i = \frac{f}{k_r} + \Delta\rho, \quad (10)$$

где  $f$  – глубина детали;

$k_r$  – технологический коэффициент  $k_r \leq 1,25$ ;

$\Delta$  – экспериментальный коэффициент  $\Delta = 1,04 \dots 1,1$ .

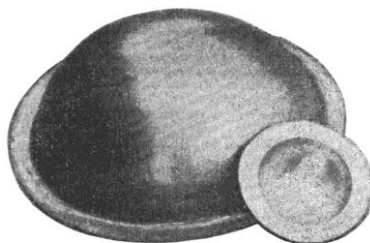


Рис. 2 – Модельные детали

**Выводы.** Таким образом, найденные зависимости (8), (9), (10) позволяют проектировать техпроцесс высокоскоростной штамповки тонкостенных деталей из различных материалов, при этом существенно увеличивая степень вытяжки за счет искусственного регулирования величин радиусов закругления протяжных ребер матриц и скорости деформирования при пневмоударной штамповке жидкостью.

**Список литературы:** 1. Фролов Е. А. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами [Текст]: моногр. / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манаенков и др. – Х.: УкрГАЗТ, – Краматорск: ДГМА, изд. центр НТУ «ХПІ», 2010. – 286 с. 2. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ [Текст] / Э. Л. Мельников. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с. 3. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов [Текст] / Ю. Н. Алексеев. – Х., 1958. – 188 с. 4. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. – М.–Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.: ил.

Поступила в редколлегию 25.05.2014