

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ДНИЩ

© Н. Н. Убизький¹, В. А. Туров², Ю. В. Оловаренко²

¹Дніпропетровський національний університет

²ДП ВО Південний машинобудівний завод ім. А. М. Макарова

Приведено математичну модель для прогнозування потоншення при витягуванні сферичних днищ у залежності від діаметра плоскої вихідної заготовки.

Неотъемлемыми элементами конструкции топливных баков изделий ракетно-космической техники являются днища. Габаритные размеры их различны, как правило, они относятся к крупногабаритным тонкостенным деталям. В большинстве случаев их изготавливают вытяжкой в штампах на прессах из круглых плоских заготовок.

Применение различной технологической схемы вытяжки днищ связано с исключением потери устойчивости (появлением гофр), характерной при вытяжке тонкостенных днищ [1, 2]. На рис. 1 приведена реверсивная схема вытяжки сферического днища. На первых переходах осуществляется необходимый набор металла, а затем производится выворот.

Фланец и цилиндрическая часть окончательного перехода, как правило, не предусмотрены конструкцией детали и представляют собой технологический припуск, подлежащий удалению. Из-за относительно большой площади припуска заготовки D_1 в 1.5–2 раза превышает диаметр днища D , поэтому напряжения и деформации вытяжки могут достигать критических значений. В отличие от вытяжки цилиндрических деталей с плоским дном, отношение значения коэффициента вытяжки не является критерием возможного разрыва за-

готовки, поскольку в начальный период штамповки днища формируются центральная сферическая часть купола, диаметр которой к моменту перехода фланца в пластическое состояние существенно меньше D . Утонение этой части может превысить допустимое значение прежде, чем начнется перемещение фланца, в этом случае следует уменьшить диаметр заготовки за счет технологического припуска, либо обеспечение заданной конструктивно толщины невозможно.

Целью предлагаемой математической модели является проверка возможности вытяжки днища на основе анализа напряженного состояния в момент перехода в пластическое состояние всей заготовки, включая фланец и прогнозирование максимального утонения в куполообразной его части.

В работах [1–3] приведены различные математические выражения для определения величины утонения при вытяжке сферических днищ, но они получены с существенными допущениями, характерными для аналитического решения задач пластического формообразования. В них не учитывается упрочнение, либо учитывается приближенно; не учитывается анизотропия свойств материала и др.

Вытяжка сферических днищ характеризуется значительными пластическими деформациями, получаемыми центральной зоны заготовки в начальной стадии.

В самом начале процесса вытяжки пуансон своей вершиной касается центра заготовки. Дальнейшее опускание пуансона приводит к возникновению меридиональных растягивающих напряжений, достаточных для перевода фланца заготовки в пластическое состояние. С этого момента начинается втягивание заготовки в матрицу и формирование сферообразной части днища.

Для части заготовки, противостоящей отверстию матрицы, меридиональные напряжения являются растягивающими, а тангенциальные напряжения являются сжимающими вблизи кромки матрицы и

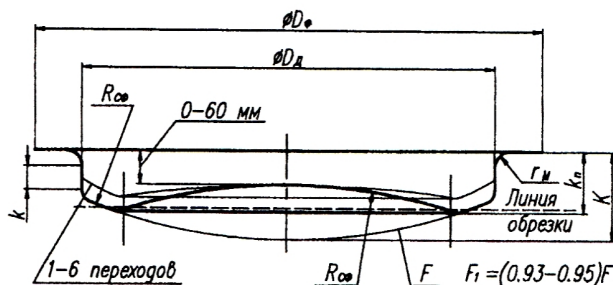


Рис. 1. Технологическая схема реверсивного способа вытяжки сферического днища

становятся растягивающими в центральной части заготовки. Пластическая деформация в условиях двухосного растяжения приводит к утонению материала центральной части дна. Утонение, как правило, приводит к небольшому увеличению поверхности заготовки и может привести к разрушению. Уменьшить величину утонения можно за счет предварительного набора металла, увеличения радиуса округления вытяжной кромки матрицы, выбора оптимального зазора между матрицей и пуансоном, созданием оптимальных условий воздействия сил внешнего трения (интенсификацией сил внешнего трения на пуансоне и уменьшением их во фланцевом очаге пластических деформаций) и др. [1, 2]. Однако наиболее существенное влияние на величину утонения центральной части дна оказывает диаметр плоской исходной заготовки. Чем больше диаметр заготовки, тем больше меридиональные растягивающие напряжения и утонение в центральной части дна.

Расчет диаметра плоской исходной заготовки выполняется, как правило, по срединной поверхности в соответствии с составленным чертежом вытягиваемого дна [4], который предусматривает необходимые технологические припуски (см. рис. 1.). С одной стороны величина диаметра заготовки долж-

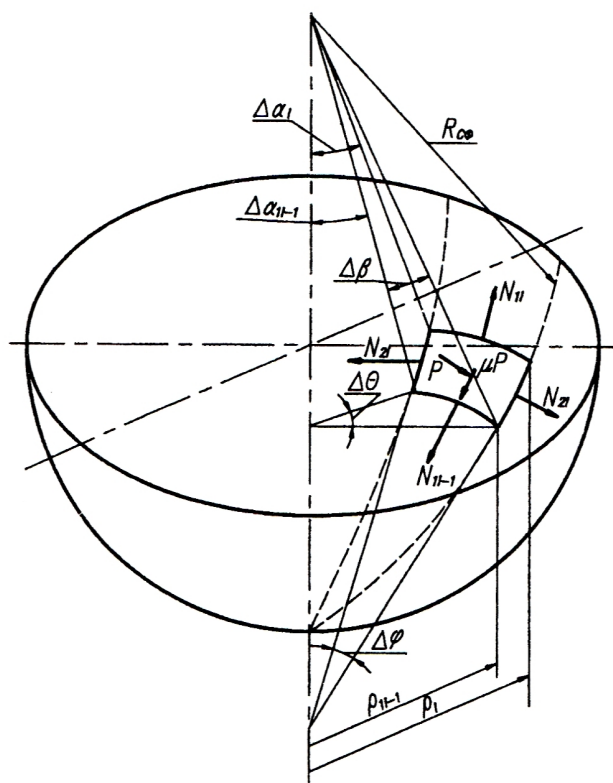


Рис. 2. Элемент центральной куполообразной части сферического днища, который находится в области двухосного растяжения

на быть достаточной для формирования обводов днища, с другой — эта величина фактически ограничена конструктивно допустимым утонением. Задаваясь величиной допустимого утонения, можно определять соответствующую ему величину допустимого диаметра заготовки и обоснованно назначать технологический припуск, без которого тонкостенные сферические днища получить невозможно.

Будем определять напряженно-деформированное состояние центральной зоны днаща, где происходит двухосное растяжение математическим моделированием. Считаем, что остальная часть заготовки пока остается неподвижной. Чтобы эта часть заготовки начала пластически деформироваться, меридиональное напряжение должно быть достаточным и соответствовать первому максимуму усилия на типовом графике изменения усилия по пути перемещения пуансона [3]. Первый максимум усилия соответствует рабочему ходу пуансона, равному глубине вытягиваемого днаща (заготовка частично облегает кромку вытяжной матрицы и пуансон). Вторым максимумом соответствует этапу принудительного утонения краевой части заготовки, утолщенной при вытяжке.

На рис. 2 и рис. 3 соответственно приведены элемент сферической оболочки, находящийся в состоянии двухосного растяжения и расчетная схема процесса пластического формообразования центральной зоны сферического днища. Она разбита на кольцевые элементы, нумерация которых начина-

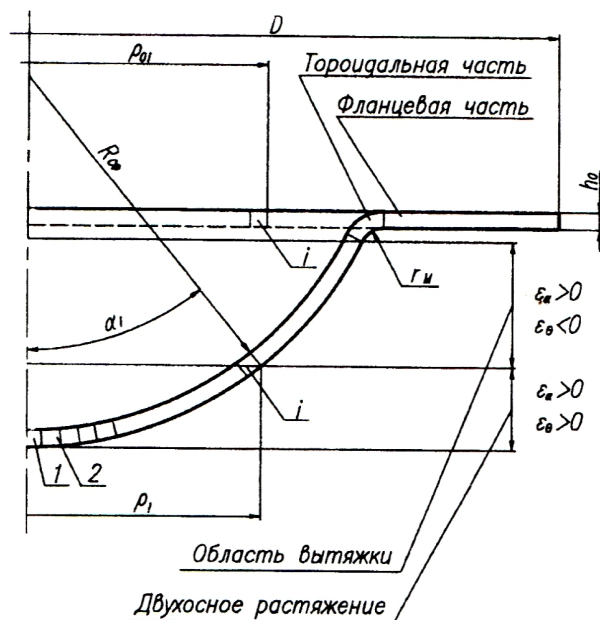


Рис. 3. Расчетная схема определения напряженно-деформированного состояния центральной части сферического днища, которая находится в состоянии двухосного растяжения

ется от оси симметрии сферического днища. Элементы показаны только по одну сторону симметрии, число их на изображении занижено. Исходная форма меридионального сечения элементов — прямоугольник, один из размеров которого равен исходной толщине материала h_{0i} , другой ρ_{0i} — соизмерим с ней, т. е. $\rho_{01} = h_0$, $\rho_{02} = \rho_{01} + h_0$, ... $\rho_{0i} = \rho_{0i-1} + h_0$.

Напряженное состояние при формообразовании центральной зоны считаем плоским. Нормальное к поверхности деформируемой заготовки напряжение σ_h не учитываем, так как ошибки при этом пренебрежении незначительны. В листовой штамповке для осе симметричных деталей это положение общепринятое. Связь между истинными напряжениями и интенсивностями деформаций аппроксимируется степенной функцией вида

$$\sigma_s = A\varepsilon^n.$$

Расчет элементов центральной зоны сферического днища проводится последовательно, начиная с 1-го, где значения меридиональной и тангенциальной деформаций совпадают: $\varepsilon_{\alpha 1} = \varepsilon_{\theta 1}$. Значения деформации по толщине $\varepsilon_{h1} < 0$ задаем в первом приближении, например $\varepsilon_{h1} = -0.2$.

Для плоского напряженного состояния справедливо следующее соотношение между деформациями: $\varepsilon_{\alpha 1} = \varepsilon_{\theta 1} = -0.5\varepsilon_{h1}$. Определяем соответствующие им значения интенсивности деформаций ε_{i1} и значения интенсивности напряжений σ_{i1} для первого элемента:

$$\varepsilon_{i1} = \frac{2K}{2K+1} \sqrt{\varepsilon_{\alpha 1}^2 + \frac{2K}{K+1} \varepsilon_{\alpha 1} \varepsilon_{\theta 1} + \varepsilon_{\theta 1}^2},$$

$$\sigma_{i1} = A\varepsilon_{i1}^n,$$

где K — коэффициент, учитывающий анизотропию свойств материала.

Геометрические параметры 1-го элемента определяются из следующих соотношений:

$$h_1 = h_0(1 + \varepsilon_{h1}),$$

$$\alpha_1 = \frac{\rho_{01}(1 + \varepsilon_{\alpha 1})}{R}, \quad \rho_1 = R \sin \alpha_1.$$

Значения меридионального $\sigma_{\alpha 1}$ и тангенциального напряжений $\sigma_{\theta 1}$ определяются из уравнений связи напряжений и деформаций по определенным ранее значениям $\varepsilon_{\alpha 1}$, $\varepsilon_{\theta 1}$, ε_{h1} , ε_{i1} :

$$\sigma_{\alpha 1} = \frac{[(K+1)^2 \varepsilon_{\alpha 1} + K(K+1) \varepsilon_{\theta 1}] \sigma_{i1}}{(2K+1) \varepsilon_1},$$

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{[(K+1)^2 \varepsilon_{\theta 1} + K(K+1) \varepsilon_{\alpha 1}] \sigma_{i1}}{(2K+1) \varepsilon_1}.$$

Таким образом, при заданной в первом приближении деформации по толщине ε_{h1} определены все параметры напряженно-деформированного состояния и геометрические параметры 1-го элемента.

Внутренние и внешние силы, действующие на i -й элемент, определяются соотношениями

$$N_{1i-1} = \sigma_{\alpha i-1} h_{i-1} \rho_{i-1} \Delta \theta,$$

$$N_{1i} = \sigma_{\alpha i} h_i \rho_i \Delta \theta,$$

$$N_{2i} = \sigma_{\theta i} h_i R (\alpha_i - \alpha_{i-1}), \quad (1)$$

$$P_i = (N_{1i} + N_{1i-1}) \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{2} + N_{2i} \Delta \theta \sin \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2}.$$

Угловые координаты связаны между собой следующим образом:

$$\Delta \varphi = \Delta \theta \cos \alpha,$$

$$\Delta \beta = \Delta \theta \sin \alpha.$$

Уравнение равновесия для произвольного элемента центральной зоны сферического днища имеют вид

$$N_{1i} = N_{1i-1} + N_{2i} \Delta \theta \cos \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} + \mu P_i, \quad (2)$$

где μ — коэффициент трения.

Подставив в уравнение равновесия (2) выражения для внутренних и внешних сил (1) и разделив обе части данного уравнения на $\Delta \theta$, имеем

$$\sigma_{\alpha i} h_i \rho_i = \sigma_{\alpha i-1} h_{i-1} \rho_{i-1} +$$

$$+ \sigma_{\theta i} h_i R_{sf} (\alpha_i - \alpha_{i-1}) \cos \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} +$$

$$+ \mu (\sigma_{\alpha i} h_i \rho_i + \sigma_{\alpha i-1} h_{i-1} \rho_{i-1}) \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{2} +$$

$$+ \mu \sigma_{\theta i} h_i R_{sf} (\alpha_i - \alpha_{i-1}) \sin \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2}. \quad (3)$$

Здесь неизвестны следующие величины: $\sigma_{\alpha i}$, $\sigma_{\theta i}$, h_i , ρ_i , α_i . Необходимо подобрать значения α_i , чтобы приближенно выполнялось равенство (3).

Определяем параметры напряженно-деформированного состояния 2-го и последующих элементов. В первом приближении для 2-го элемента задаем $\alpha_2 = 2\alpha_{i-1}$, для остальных — $\alpha_i = 2\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2}$.

Параметры i -го элемента определяются последовательно из соотношений

$$\rho_i = R_{sf} \sin \alpha_i,$$

$$\varepsilon_{\theta i} = \frac{\rho_i - \rho_{0i}}{\rho_{0i}},$$

$$\varepsilon_{\alpha i} = \frac{R_{sf} (\alpha_i - \alpha_{i-1})}{\rho_{0i} - \rho_{0i-1}} - 1,$$

$$\varepsilon_{hi} = -\varepsilon_{\alpha i} - \varepsilon_{\theta i},$$

$$h_i = h_0(1 + \varepsilon_{hi}).$$

Значения интенсивности напряжений ε_i элемента и истинного напряжения σ_{si} для i -го равны соответственно

$$\varepsilon_i = \frac{2K}{2K+1} \sqrt{\varepsilon_{ai}^2 + \frac{2K}{K+1} \varepsilon_{ai} \varepsilon_{\theta i} + \varepsilon_{\theta i}^2},$$

$$\sigma_{si} = A \varepsilon_i^n,$$

Значения меридионального σ_{ai} и тангенциального $\sigma_{\theta i}$ напряжений равны соответственно

$$\sigma_{ai} = \frac{[(K+1)^2 \varepsilon_{ai} + K(K+1) \varepsilon_{\theta i}] \sigma_{si}}{(2K+1) \varepsilon_i},$$

$$\sigma_{\theta i} = \frac{[(K+1)^2 \varepsilon_{\theta i} + K(K+1) \varepsilon_{ai}] \sigma_{si}}{(2K+1) \varepsilon_i}.$$

В начале итерационного вычисления α_i из (3) левая часть уравнения получается больше правой, так как в первом приближении значение радиальной деформации ε_{ai} задано завышенным — равным ε_{ai-1} , а эта деформация должна убывать от центра днища к периферии. Чтобы процесс итерационного вычисления α_i сходил, последующие приближения α_i уменьшаем в цикле с шагом $0.001\alpha_i$, пока не выполнится равенство (3). После этого переходим к вычислению следующего элемента с номером $i+1$.

Если же после первого приближения α_i левая часть (3) оказывается меньше правой, расчет второго элемента не выполняем, а изменяем принятое в первом приближении значение деформации по толщине ε_{hi} для 1-го элемента ближе к нулю. Эта ситуация означает, что в качестве первого приближения было задана такая деформация по толщине ε_{hi} , при которой двусное растяжение вышло за предел устойчивости и произойдет разрушение днища в центральной части.

После расчета i -го элемента центральной части днища, прежде чем начинать расчет последующего элемента с номером $i+1$, проверяем этот элемент на принадлежность центральной части днища. Проверка осуществляется путем определения знака тангенциальной деформации $\varepsilon_{\theta i}$.

Для центральной зоны днища тангенциальная деформация должна быть отрицательной, т. е. должно соблюдаться условие $\varepsilon_{\theta i} > 0$. Если данное условие не выполняется, значит по элементу с номером i проходит граница между областью двусосного растяжения, где значения меридиональной ε_{ai} и тангенциальной $\varepsilon_{\theta i}$ деформаций должны быть положительны, т.е. $\varepsilon_{ai} > 0$ и $\varepsilon_{\theta i} > 0$ и областью вытяжки, где $\varepsilon_{ai} > 0$ и $\varepsilon_{\theta i} < 0$. На этом фактически расчет элементов центральной части сферического днища заканчивается.

Напряженно-деформированное состояние i -го элемента соответствует моменту начала пластического деформирования фланцевой части вытягиваемой заготовки, т. е. началу перемещения края исходной, круглой заготовки диаметром D . Значение диаметра D определяем из формулы Е. А. Попова [3], устанавливающей значение максимального радиального напряжения σ_{rmax} (для определения радиуса исходной заготовки — $\sigma_{rmax} = \sigma_{ai}$) на кромке вытяжной матрицы скругленной радиусом r_m :

$$D = 2r_m \exp \left(\frac{\sigma_{ai}}{e^{\mu \alpha_i} \sigma_{02}} - \frac{\mu Q}{\pi R h_0} - \frac{h_0}{\sigma_{02}(2r_m + h_0)} \right),$$

где r — радиус отверстия вытяжной матрицы, σ_{02} — напряжения текучести материала, α_i — угол обхвата скругленной радиусом r_m кромки вытяжной матрицы, R — расчетное значение радиуса исходной круглой заготовки, Q — усилие прижима, μ — коэффициент трения. Расчетные значения деформаций ε_{hi} , $\varepsilon_{\theta i}$ и ε_{ai} , полученные при математическом моделировании, хорошо согласуются с проведенными экспериментальными исследованиями по вытяжке сферических днищ.

Результаты численного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

— вероятность разрушения заготовки на начальной стадии вытяжки тем больше, чем меньше показатель степенной функции упрочнения материала n ;

— влияние коэффициента K нормальной анизотропии на той же стадии неоднозначно: при его увеличении уменьшается диаметр опасной зоны двусосного растяжения и ее утонение $|\varepsilon_h|$, но одновременно уменьшается также и критическое значение $|\varepsilon_h|$.

1. Мошнин Е. Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей — М.: Машиностроение, 1979. — 239 с.
2. Мельников Э.Л. Холодная штамповка днищ. — М.: Машиностроение, 1986. — 190 с.
3. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки — М.: Машиностроение, 1968. — 281 с.
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. — Л.: Машиностроение, 1979. — 190 с.

DETERMINATION OF A DIMINUTION OF A THICKNESS FOR WANT OF PLASTIC FORMATION OF THE BOTTOMS OF THE SPHERICAL FORM

N. N. Ubizky, V. A. Turov, U. V. Olovarenko

The mathematical model for determination of a diminution of a thickness for want of plastic shaping of the bottoms of the spherical form is indicated depending on a diameter of flat initial bar.