

Моделирование процесса пластического деформирования применительно к тонкостенным оболочкам типа днищ

Е.Г. Демьяненко¹, И.П. Попов¹, А.Ю. Косолапова¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассмотрен способ получения деталей типа днище, основанный на процессе отбортовки. Представлены результаты физического моделирования равнотолщинных деталей типа днище. Определены параметры реологической модели холодной деформации. Приведены методика расчета заготовки и результаты моделирования.

1. Введение

В современных условиях конкурентоспособность изделий определяется сочетанием минимальной себестоимости их изготовления и высокого качества. Существует множество способов получения деталей типа днищ. Это связано с различным функциональным назначением деталей, повышенными требованиями к их точности и разнообразием применяемых листовых конструкционных материалов.

В настоящее время значительную часть днищ в промышленности изготавливают способами холодной штамповки на прессах: формовкой, вытяжкой, отбортовкой с последующей сваркой [1].

2. Объект исследования

Характерной чертой данной группы днищ является то, что с увеличением размеров возможно образование утонения стенки при формообразовании поэтому, необходимо в каждом конкретном случае подбирать параметры процесса штамповки математическим методом, находя оптимальные решения.

При вытяжке потеря устойчивости заготовки на фланце возникает в зоне, свободной от контакта с инструментом. В некоторых случаях при дальнейшем формообразовании (после момента появления складок) складки достигают значительных величин. При относительной толщине детали $S_0/D_d \times 100 < 0,5$ что приводит, как правило, к быстрому упрочнению материала, уменьшению его пластичности и разрыву в местах наибольшего складкообразования.

Размеры рассматриваемой детали днище представлены на рисунке 1.

Деталь в силу больших габаритов представляет для процессов формообразования из листа относительно тонкостенную оболочку. Поэтому её деформирование необходимо проводить в условиях напряженного состояния растяжения, во избежание гофрообразования.

С учетом существующих ограничений, из нескольких вариантов формообразования детали из плоской заготовки предпочтительнее применять процесс отбортовки. Условием,

обеспечивающим устойчивость процесса отбортовки, является соотношение максимальных меридиональных напряжений.

$$\sigma_{\rho_{\text{В}}} \geq \sigma_{\rho_{\text{от}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\rho_{\text{В}}}$ и $\sigma_{\rho_{\text{от}}}$ – соответственно, максимальные меридиональные напряжения плоских частей фланца при выходе из под прижима и части заготовки для отбортовки.

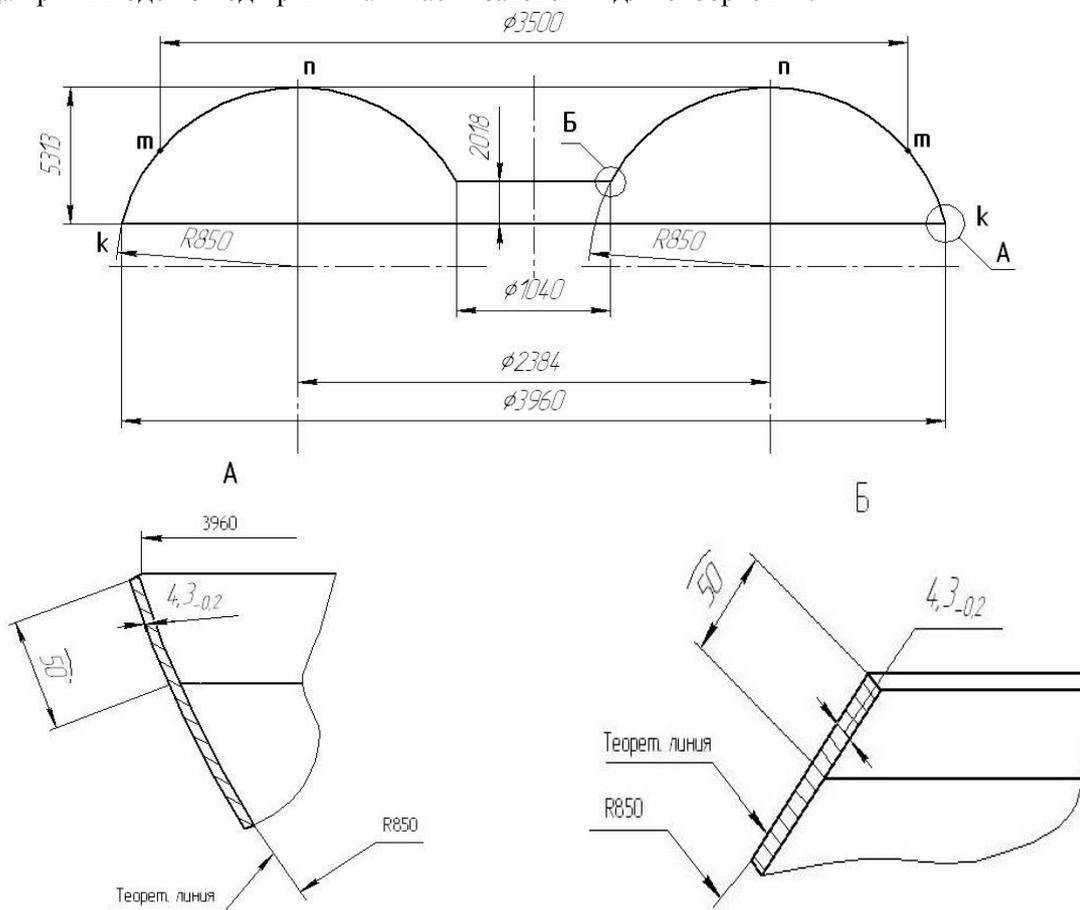


Рисунок 1. Деталь днище ($S = 5,8 \times 10^{-3}$ м, АМГ6М).

Для идеального случая оно составляет:

$$\sigma_{\rho_{\text{от}}} = \sigma_s \left(1 - \frac{r_m}{R_\sigma}\right) \quad (2)$$

Напряжение возможной вытяжки детали с плоским фланцем для идеального случая вычисляется:

$$\sigma_{\rho_{\text{В}}} = \sigma_s \ln \left| \frac{R_{\text{заг}}}{R_\sigma} \right| \quad (3)$$

где r_m - радиус отверстия под отбортовку; R_σ - радиус сечения заготовки при выходе из под прижима; $R_{\text{заг}}$ - радиус кромки заготовки.

Формулы (2) и (3) дают оценочные решения, которые могут быть применены в процессе моделирования с использованием программных продуктов.

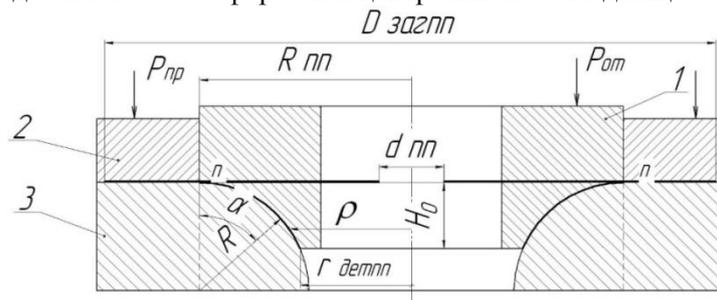
Разобьем деталь на три части, ограниченных сечениями с диаметрами: $D_{\text{кк}} = 3960 \cdot 10^{-3}$ м; $D_{\text{нн}} = 2384 \cdot 10^{-3}$ м. Их значения выбраны из условия, что диаметры заготовки под прижимом, с увеличением размеров детали, должны из-за ограничения размеров пресса уменьшиться. Для обеспечения неподвижности фланца при отбортовке следует выполнять условия:

$$\frac{r_{\text{нн}}}{R_{\text{нн}}} \geq \frac{r_{\text{мм}}}{R_{\text{мм}}} \geq \frac{r_{\text{кк}}}{R_{\text{кк}}},$$

где r_{nn}, r_{mm}, r_{kk} - соответственно, радиусы отверстий под отбортовку для деталей, ограниченных размерами стыковки по сечениям с диаметрами: $D_{nn} = 2R_{nn}$; $D_{kk} = 2R_{kk}$; $D_{mm} = 2R_{mm}$.

При проектировании следует учесть ограничения, как объективного, так и субъективного характера. В первую очередь сюда относятся характеристики гидравлического пресса «DNC - 2600/2000-6,0 5,0 Schuler». Во-вторых, минимальная толщина должна быть больше или равна на выпуклых торообразных частях детали и больше или равна на торцах меньшего и большего диаметров [2].

На рисунке 3 представлена схема формовки центральной части днища.



$d_{nn} = 720 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $R_{nn} = 1192 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $R = 850 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_{демпп} = 487 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ 1-пуансон; 2- прижим; 3- матрица; H_0 - высота отформованной части; $\alpha_{дет}, \rho$ - текущие координаты угла и радиуса центральной части; $P_{пр}, P_{от}$ - усилия прижима и отбортовки

Рисунок 3. Схема формовки центральной части днища.

Средняя часть днища ограничена сечением с диаметрами: $D_{nn} = 2 \cdot 1192 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $D_{mm} = 3500 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

По формуле (6) находим:

$$R_{загmm} = R_{загmm} \cdot \exp\left(1 - \frac{r_{mm}}{R_{mm}}\right) = \frac{3500}{2} \cdot \exp\left(1 - \frac{1192}{1750}\right) = 2410 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (6)$$

Принимаем размеры средней части заготовки диаметром $D_{загmm} = 4990 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а диаметр отверстия $d_{mm} = 2200 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Краевая часть днища ограничена сечениями диаметром $D_{kk} = 3990 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $D_{mm} = 3500 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Используя формулу (7), определим:

$$R_{загkk} = R_{kk} \cdot \exp\left(1 - \frac{R_{mm}}{R_{kk}}\right) = 1995 \cdot \exp\left(1 - \frac{1750}{1995}\right) = 2257,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (7)$$

Принятые размеры краевой части заготовки $D_{kk} = 4990 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_{kk} = 3100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Количество промежуточных отжигов, рассчитано исходя из возможного обрыва кромки отверстия, приняв процесс деформирования кромки аналогично процессу линейного растяжения.

$$e_{кр} = \delta_p \cdot n \quad \text{или} \quad (8)$$

$$r_{демпп} = r_{nn} \cdot e^{\delta_p N}, \quad (9)$$

где N - число отжигов.

Для центральной части днища: $N_{nn} = \frac{\ln \frac{r_{демпп}}{r_{nn}}}{\delta_p} = \frac{\ln \left[\frac{478}{360} \right]}{0.13} = 2,3 \rightarrow 3$. Для средней части:

$N_{mm} = \frac{\ln \frac{r_{демпп}}{r_{mm}}}{\delta_p} = \frac{\ln \left[\frac{1192}{1100} \right]}{0.13} = 0,61 \rightarrow 1$. Для краевой части: $N_{kk} = \frac{\ln \frac{r_{демпп}}{r_{kk}}}{\delta_p} = \frac{\ln \left[\frac{1750}{1550} \right]}{0.13} = 0,93 \rightarrow 1$.

3. Результаты моделирования

В достаточно трудоемких задачах применение современных средств автоматизации позволяет исключить значительную часть рутинной работы и представить в наглядной форме результаты моделирования [3].

Для определения напряжённо-деформированного состояния и энергосиловых параметров, в процессах обработки металлов давлением, широко применяются программные комплексы, основанные на методе конечных элементов. При моделировании используется материал с коэффициентом анизотропии трансверсально-изотропного тела, с показателями механических свойств: $\sigma_{02} = 15,5 \text{ МПа}$; $\sigma_e = 31,5 \text{ МПа}$; $\delta_p = 0,13 \text{ МПа}$ модуль упругости $E = 7,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент трения принимается равным $f = 0,2$. В процесс включена программа адаптации, уменьшающая элементарную сетку при отклонении их соседних элементов на один градус. Скорость деформирования 100 мм/сек . Заготовка получена аргонодуговой сваркой из листов шириной $2500 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ номинальной толщиной $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Ширина сварного шва $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Принятые для него характеристики: $\sigma_{02} = 15,5 \text{ МПа}$; $\sigma_e = 27 \text{ МПа}$; $\delta_p = 0,13$.

Заготовка имеет осевую симметрию и для расчета использовалась 1/4 объема, заключенного между координатными плоскостями XOY и YOZ (ось OY совмещалась с осью симметрии) [3, 4, 5].

Кривая упрочнения алюминиевого сплава АМг6М [3] представлена на рисунке 2.

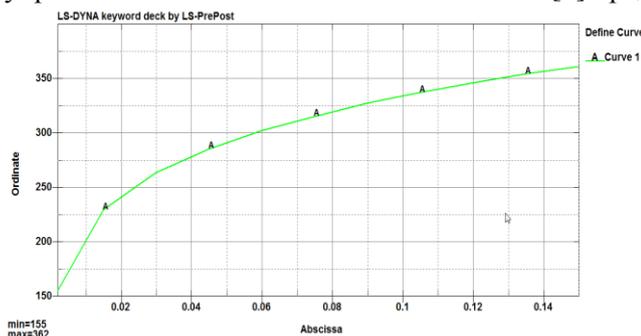


Рисунок 2. Кривая упрочнения сплава АМг6М.

Рассмотрена схема отбортовки центральной части днища (см. рисунок 3) с учетом припуска под обрезку отбортованного торца: примем высоту $H_0 = 374 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Диаметр отверстия под отбортовку находится в первом приближении из равенства длин образующих отбортованной части детали и длины образующей заготовки с отверстием свободным от прижима:

$$R_{nn} - r_{nn} = R \cdot \alpha_{dem},$$

$$r_{nn} = R_{nn} - R \cdot \alpha_{dem} = 1192 - 650 \cdot 0,974 = 363,74 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (4)$$

Принято, что $r_{nn} = 363,74 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и приравняв уравнения (2) и (3) получим:

$$R_{загн} \geq R_{nn} \cdot \exp\left(1 - \frac{r_{nn}}{R_{nn}}\right) \geq 1192 \cdot \exp\left(1 - \frac{360}{1192}\right) = 2384 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (5)$$

Таким образом, только центральная часть требует три промежуточных отжига.

Данные моделирования – геометрия, конечно – элементная сетка, графики изменения толщин характерных элементов, которые представлены на (рисунки 4 – 9).

Формообразование тонкостенных и особо тонкостенных днищ сопровождается интенсивным растяжением. В рассматриваемом методе разнотолщинность носит допустимый характер и не превышает минимально допустимого коэффициента ($> 10\%$).

Основным недостатком предложенного варианта является использование крупногабаритной штамповой оснастки. Технология реализуется достаточно трудоёмко, но при использовании процесса отбортовки способом обтяжки процесс упрощается.

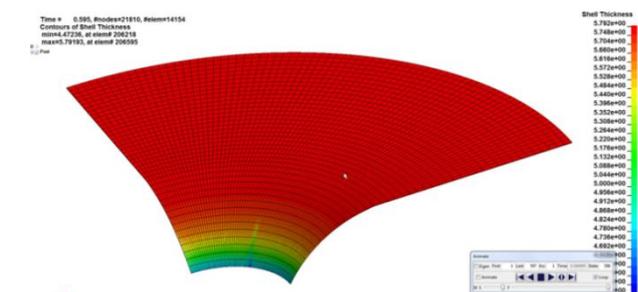


Рисунок 4. Изменение толщины полуфабриката 1-го перехода, мм.

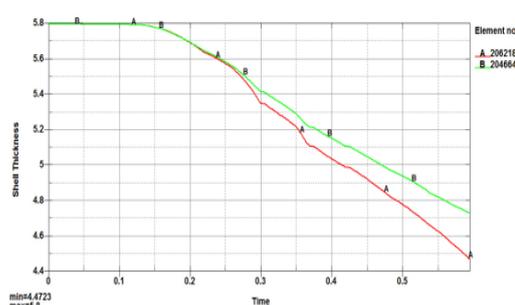


Рисунок 5. Изменение толщины характерных элементов на торце полуфабриката 1-го перехода, мм.

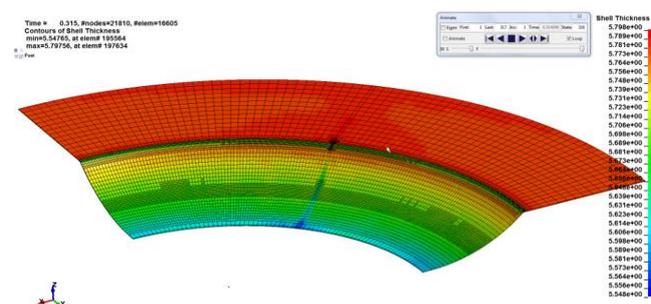


Рисунок 6. Изменение толщины полуфабриката 2-го перехода, мм.

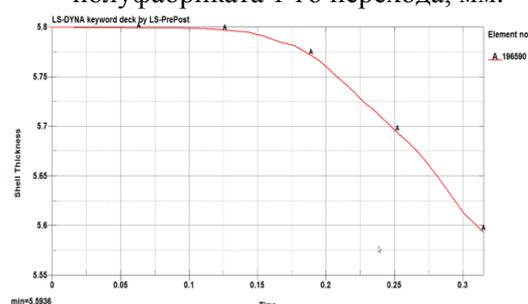


Рисунок 7. Изменение толщины характерного элемента на торце полуфабриката 2-го перехода, мм.

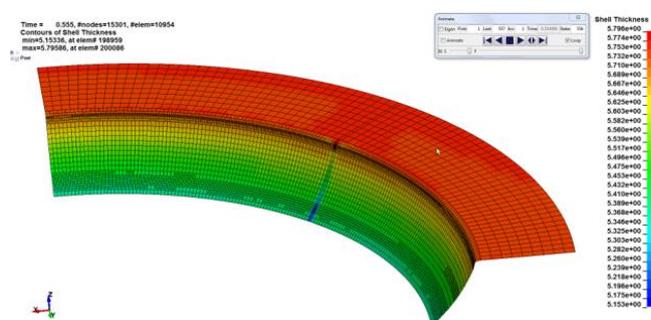


Рисунок 8. Изменение толщины полуфабриката 3-го перехода, мм.

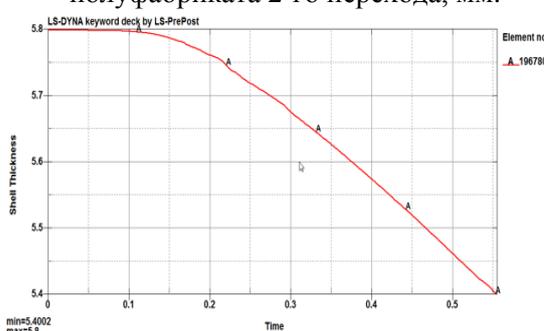


Рисунок 9. Изменение толщины характерного элемента на торце полуфабриката 3-го перехода, мм.

4. Выводы

Предлагаемый способ изготовления равнотолщинных деталей типа днищ с использованием технологии, основанной на процессе отбортовки (способ обтяжки) и отбортовки центральной части днища эффективен и достаточно прост в реализации и предполагает изготовление детали из двух частей методом сварки.

Центральная часть, ограниченная диаметром D_{nn} и сферическая часть, ограниченная диаметрами D_{kk} и D_{nn} . В последнем случае возможно использовать обтяжное оборудование для получения лепестков, которые представляют составные элементы сферической части (6 штук). Разработанная методика расчёта формы и толщины стенки детали подтверждена математическим моделированием и аналитическими значениями.

5. Литература

[1] Демьяненко, Е.Г. Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усечённой сужающейся формы на основе процесса отбортовки // Известия СНЦ РАН. – 2013. – Т. 15, № 4-1. – С. 187-191.

- [2] Демьяненко, Е.Г. Разработка способа изготовления тонкостенной конической оболочки совмещенным способом формовки-отбортовки / И.П. Попов, Е.Г. Демьяненко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2013. – Т. 7. – С. 63-66.
- [3] Демьяненко, Е.Г. Анализ технологических процессов отбортовки-формовки в системе LS-DYNA / Е.Г. Демьяненко, С.Ф. Глушенко, И.П. Попов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 282-286.
- [4] Grechnikov, F.V. Influence of Material Structure Crystallography on its Formability in Sheet Metal Forming Processes / F.V. Grechnikov, S.V. Surudin, Y.A. Erisov, A.O. Kuzin, I.N. Bobrovskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 286(1).
- [5] Mikheev, V.A. The results comparasion of calculation method and computer modeling of double curvature sheet shells in stretch forming process / V.A. Mikheev, S.V. Surudin // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – P. 21-28.

Modeling of plastic deformation process for thin-walled shells of bottom type

E.G. Demyanenko¹, I.P. Popov¹, A.Yu. Kosolapova¹

¹SamaraNational Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Disclosed is a method of producing bottom-type parts based on a flanging process. Results of physical modeling of equivalent-thickness parts of bottom type are presented. Parameters of rheological model of cold deformation are determined. The procedure of procurement calculation and simulation results are given.