

УДК 621.983.3

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-15-23>

Научная статья

Research article



## Совершенствование процесса формообразования в условиях плоского напряженного состояния растяжения

Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, А.А. Левагина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

✉ Алина Александровна Левагина (aline.levagina@yandex.ru)

**Аннотация:** В ракетно-космической и авиационной технике активно применяются тонкостенные осесимметричные детали усеченной сужающейся формы, изготовленные из листовых заготовок. Совершенствование процессов их формообразования, в основе которых направленное изменение толщины материала с целью получения деталей с минимальной разнотолщинностью, позволит обеспечить ведущие позиции предприятий авиационной и космической отраслей промышленности, а также гарантирует снижение трудозатрат. Данная работа посвящена исследованию возможности получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы одним из способов листовой штамповки в условиях плоского напряженного состояния растяжения (отбортовкой). Выявлен механизм и проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формоизменения с учетом выражения минимизации между заданной и технологически возможной толщинами. Разработана математическая модель рассматриваемого способа формообразования, основанного на процессе отбортовки. Теоретические исследования основывались на положениях теории пластического деформирования листовых материалов путем совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия сил, уравнений связи, условия пластичности и основных определяющих соотношений при заданных начальных и граничных условиях. С целью исключения ошибок при проектировании инструмента для перспективной реализации способа на изготовленной штамповой оснастке, а также для подтверждения теоретических выводов по выбору технологических параметров и достижения минимальной разнотолщинности проведено моделирование процесса отбортовки в программном комплексе LS-DYNA с исходными данными конической заготовки из стали 12X18H10T: угол конусности  $16,4^\circ$ , толщина  $S_{\text{заг}} = 0,3$  мм. Представлены этапы компьютерного моделирования с указанием основных параметров процесса, таких как модель материала, механические характеристики материала заготовки, тип элементов, кинематические нагрузки, условия контактного взаимодействия элементов между собой и т.д.

**Ключевые слова:** отбортовка, толщина, тонкостенная, минимизация, формообразование, процесс, инженерный метод, напряжения, LS-DYNA, моделирование.

**Для цитирования:** Демьяненко Е.Г., Попов И.П., Левагина А.А. Совершенствование процесса формообразования в условиях плоского напряженного состояния растяжения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(4):15–23.  
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-15-23>

## Improving shape formation under conditions of plane tensile stress

E.G. Demyanenko, I.P. Popov, A.A. Levagina

Samara National Research University  
34 Moscovskoe shosse, Samara 443086, Russia

✉ Alina A. Levagina (aline.levagina@yandex.ru)

**Abstract:** Thin-walled axisymmetric truncated parts made of sheet billets are actively used in rocket and aerospace engineering. Improvement to their shape formation, based on directed material thickness change will ensure the production of parts with minimum thickness variation. This will also enable aviation and space industry enterprises to attain leading positions, as well as reduce labor costs. This work studies the

possibility of obtaining thin-walled axisymmetric parts of truncated tapered shape using one of the methods of sheet metal stamping under flat tensile stress conditions (flanging). The mechanism was identified and the analysis of the stress-strain state of the billet during deformation was carried out. This takes into account the minimizing of the difference between the specified and technologically possible thicknesses. A mathematical model was developed to consider the shaping method based on the process of flanging. Theoretical studies were based on the principles of the plastic deformation theory of sheet materials. This was achieved by the following factors: approximate differential equations of force equilibrium; equations of constraint; plasticity conditions; and fundamental constitutive relations under given initial and boundary conditions. The process of flanging was simulated using the LS-DYNA software package with the following initial data of a conical billet made of 12Kh18N10T steel: cone angle  $16.4^\circ$ , thickness  $S_{\text{billet}} = 0.3$  mm. The aim was to eliminate errors in designing a tool for future implementation of the method on a manufactured die tooling, as well as to confirm the theoretical conclusions on the selection of technological parameters and achieve minimal thickness variation. The steps of computer modeling are presented, indicating the main process parameters such as material model, mechanical characteristics of the workpiece material, type of elements, kinematic loads, conditions of contact interaction of elements with each other, etc.

**Keywords:** flanging, thickness, thin-walled, minimization, shape formation, process, engineering method, stresses, LS-DYNA, simulation.

**For citation:** Demyanenko E.G., Popov I.P., Levagina A.A. Improving shape formation under conditions of plane tensile stress. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(4):15–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-15-23>

## Введение

Обшивки отсеков, обтекателей, топливные баки различных форм и размеров, баллоны хранения газов, сопловые оболочки, оболочки камер сгорания двигателей и другие детали, применяемые в ракетно-космической и авиационной индустрии, должны обеспечивать заданные эксплуатационные характеристики, а также удовлетворять конструкторским требованиям, которые определяют технологическую возможность их изготовления [1–4]. Известные способы формообразования [5–7] таких деталей не в полной степени обеспечивают получение необходимой и равномерно распределенной их толщины (например, при многократной вытяжке разнотолщинность может достигать 80 %), что влечет за собой увеличение числа технологических переходов, снижение коэффициента использования материала из-за последующей механической обработки и общее повышение издержек производства. Сопутствующими проблемами при этом являются гофрообразование (локальная потеря устойчивости деформирования) и ухудшение качества поверхности.

Чтобы избежать проявления дефектов [8–10] у тонкостенных деталей с отношением заданной толщины заготовки к ее большему диаметру  $S_{\text{зад}}/D < 0,08$ , формообразование проводится в условиях напряженного состояния, близкого к плоскому напряженному состоянию растяжения, например с использованием процессов отбортовки и формовки. Кроме того, важно разрабатывать процесс таким образом, чтобы толщина заготовки изменялась в направлении, связанном с заданной толщиной детали. Для этого в реальных процессах деформирования становится важным обеспечить минимальную разнотолщинность детали, которая

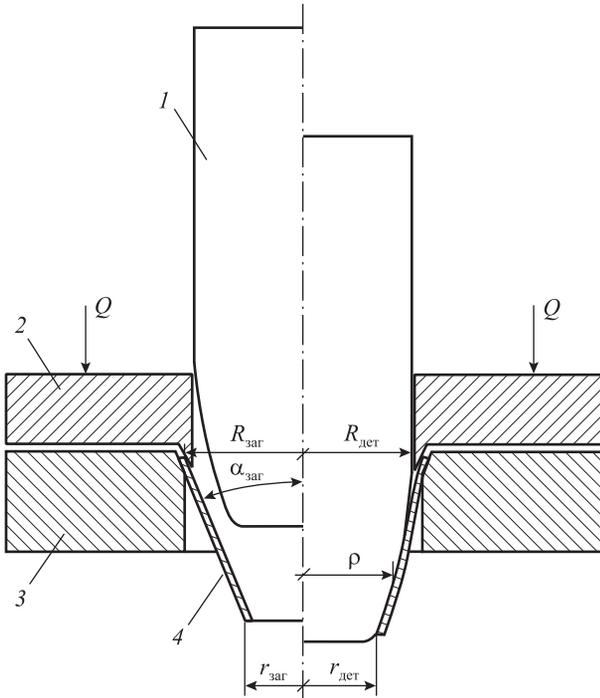
определяется как выражение минимизации в виде интегральной квадратичной разницы между заданной и технологически возможной толщинами.

В связи с этим цель настоящей работы состояла в разработке методики получения деталей заданной толщины из конической заготовки путем отбортовки.

## Теоретические исследования процесса отбортовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

В работе отражены результаты исследования только для относительно невысоких деталей (отношения высоты к большему диаметру  $H/D \approx 1$  и диаметра к относительной кривизне  $D/R_p < 0,045$ ). Рассмотрим способ изготовления подобных тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы с минимальной разнотолщинностью из конической заготовки на основе процесса отбортовки. При этом используем теорию пластического деформирования листовых материалов с учетом анизотропии механических свойств исходной заготовки и оценку условий устойчивого формообразования при плоском напряженном состоянии растяжения. При минимизации выражения разницы между заданной и технически возможной толщинами расширяются возможности анализа процессов. На рис. 1 представлена схема устройства, поясняющая способ отбортовки детали из конической заготовки.

Коническая заготовка 4 зажимается между матрицей 3 и прижимом 2, обеспечивая неподвижную часть фланца заготовки под прижимом во время формообразования. Так, например, при опуска-



**Рис. 1.** Геометрическая схема формообразования

1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – заготовка/деталь  
 $R_{\text{заг}}$  и  $R_{\text{дет}}$  – наибольшие радиусы заготовки и детали, мм;  
 $\alpha_{\text{заг}}$  – угол конусности заготовки, град;  $r_{\text{заг}}$  и  $r_{\text{дет}}$  – наименьшие радиусы заготовки и детали, мм;  $Q$  – усилие и направление прижима, Н;  $\rho$  – текущий радиус детали, мм

**Fig. 1.** Geometric layout of shape formation

1 – punch, 2 – blank holder, 3 – mold, 4 – workpiece/part  
 $R_{\text{billet}}$  and  $R_{\text{part}}$  are the major radii of billet and part, mm;  
 $\alpha_{\text{billet}}$  is the billet cone angle, deg.;  $r_{\text{billet}}$  and  $r_{\text{part}}$  are the minor radii of billet and part, mm;  $Q$  is the force and direction of clamping, N;  
 $\rho$  – is the current radius of part, mm

нии пуансона  $l$  вниз, за счет разной конфигурации геометрии пуансона и заготовки, в первую очередь происходят касание и деформирование заготовки в элементах меньшего диаметра. По мере опускания пуансона элементы заготовки с координатами большего диаметра вступают в зону очага деформации. Процесс прекращается в момент начала пластической деформации кромки заготовки.

За счет размеров и геометрии пуансона и заготовки возможно регулировать толщину последней по длине образующей и в результате получать деталь с толщиной, либо близкой к постоянной, с минимальной разнотолщинностью, либо с переменной (монотонной), близкой к заданной, и также с минимальной разнотолщинностью (с ее уменьшением от элементов кромки малого диаметра к элементам с большего диаметра, и наоборот). Основными факторами, влияющими на описанное выше распределение толщины стенки

детали, являются угол наклона образующей конической заготовки, трение, механические свойства заготовки (например, коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела) [11].

Направленное изменение толщины заготовки к заданной толщине детали возможно путем варьирования постоянных в процессе технологических параметров [12] (размеров заготовки, геометрии инструмента, коэффициента трения, граничных условий, показателей механических свойств и т.д.) и требует аналитически [13–15] представленного и решенного выражения минимальной разнотолщинности [16–18]:

$$\iint_F (S_{\text{зад}} - S_T)^2 dF \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $S_{\text{зад}}$  – заданная толщина детали, мм;  $S_T$  – технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки, мм;  $F$  – площадь детали по срединной поверхности, мм<sup>2</sup>.

Математическое условие достижения заданного распределения постоянной толщины стенки детали для реализации предложенного способа запишем в виде

$$\iint_{r_{\text{дет}}}^1 \left[ (\bar{S}_{\text{зад}} - 1) - Q \left( 1 - \frac{\bar{r}_{\text{заг}}}{\bar{\rho}} \right) \right]^2 d\rho \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\bar{S}_{\text{зад}} = S_{\text{зад}}/S_{\text{заг}}$ ,  $\bar{r}_{\text{заг}} = r_{\text{заг}}/R_{\text{дет}}$  и  $\bar{\rho} = \rho/R_{\text{дет}}$ .

Обозначим величину  $Q$ :

$$Q = (1 - \mu) [(1 + \bar{\sigma}_{\rho k}) / (\mu \bar{\sigma}_{\rho k} - 1)] = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\bar{\sigma}_{\rho k} = \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}$  – соотношение напряжений, которое определяется инженерным методом с использованием уравнения равновесия в полярной системе координат [19]. Для случая формообразования заготовки при допущении, что дополнительное давление  $q = 0$ , оно примет вид

$$\rho \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + d\sigma_{\rho} - d\sigma_{\theta} - \frac{f\rho}{\sin \alpha_0} \left( \frac{\sigma_{\rho}}{R_{\rho}} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}} \right) = 0,$$

где  $R_{\rho}$  и  $R_{\theta}$  – радиусы детали в меридиональном и тангенциальном направлениях;  $\sigma_{\rho}$  и  $\sigma_{\theta}$  – напряжения в меридиональном и тангенциальном направлениях, Па;  $f$  – коэффициент трения на внутренней поверхности заготовки;  $\alpha_0$  – угол наклона образующей детали к оси, град.

Запишем условие пластичности при отбортовке:

$$\beta \sigma_s = \sigma_{\theta}, \quad (4)$$

где  $\beta = 2 / \sqrt{7 - 6\mu}$  – коэффициент, определяющий

напряженно-деформированное состояние процесса с учетом анизотропии механических свойств исходной заготовки [20].

При геометрическом соотношении  $\rho = R_\theta \cos\alpha$  и допущении  $\sigma_\rho/R_\rho = 0$  запишем уравнение равновесия:

$$\bar{\rho} \frac{d\sigma_\rho}{d\bar{\rho}} + \sigma_\rho - \beta\sigma_s(1 + f\text{ctg}\alpha) = 0, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — угол наклона касательной к оси детали, проведенной в средней части очага деформации, град.

Считая, что на соотношение напряжений  $\sigma_\rho/\sigma_\theta$ , как показано в работе [19], упрочнение [21–23] и изменение толщины не оказывают влияния, можно найти напряжения  $\sigma_\rho$  в заготовке при граничных условиях:  $\sigma_\rho = 0$ ,  $\bar{\rho} = \bar{r}_{\text{дет}}$  и  $\bar{\rho} = \rho/R_{\text{дет}}$ .

Будем считать, что напряжение в очаге деформации постоянно и равно среднему интегральному значению. Его величину определим по известной формуле [19] с учетом, что меридиональное напряжение равно

$$\sigma_\rho = \beta(1 + f\text{ctg}\alpha)(1 - \bar{r}_{\text{дет}}/\bar{\rho}), \quad (6)$$

тогда среднее интегральное значение

$$\bar{\sigma}_{\rho k} = \frac{\sigma_{\rho k}}{\sigma_\theta} = \frac{(1 + f\text{ctg}\alpha) \int_{\bar{r}_{\text{дет}}}^1 (1 - \bar{r}_{\text{дет}}/\bar{\rho}) d\bar{\rho}}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}}. \quad (7)$$

После алгебраических преобразований получим

$$\bar{\sigma}_{\rho k} = (1 + f\text{ctg}\alpha) \frac{1 - \bar{r}_{\text{дет}}(1 - \ln \bar{r}_{\text{дет}})}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}}. \quad (8)$$

Далее необходимо определить соотношение  $\bar{r}_{\text{заг}}/\bar{\rho}$ . Примем следующее допущение:

$$\bar{r}_{\text{заг}} = a + b\bar{\rho}. \quad (9)$$

При  $\bar{\rho} = \rho/R_{\text{дет}}$  и  $\bar{r}_{\text{заг}} = r_{\text{заг}}/R_{\text{дет}} = 1$  выражение (7) запишется в виде

$$\bar{b} = 1 - \bar{a}. \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (9) будет представлено в следующей форме:

$$\bar{r}_{\text{заг}} = \bar{a} + (1 - \bar{a})\bar{\rho} = \bar{a}(1 - \bar{\rho}) + \bar{\rho}. \quad (11)$$

Проведем минимизацию для случая изменения заданной толщины детали: ее уменьшения от большего диаметра. При такой схеме отбортовки (рис. 1) определяющая зависимость заданной толщины описывается формулой

$$\bar{S}_{\text{зад}} = 1 - [m/(1 - \bar{r}_{\text{дет}})](1 - \bar{\rho}), \quad (12)$$

где  $m = 1 - S_{\text{зад}}/S_{\text{заг}} < 1$ .

Запишем условие минимизации (2) с учетом (12):

$$\int_{\bar{r}_{\text{дет}}}^1 \left[ -\frac{m}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}} (1 - \bar{\rho}) + Q \left( 1 - \frac{\bar{r}_{\text{заг}}}{\bar{\rho}} \right) \right]^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Выражение (14) с учетом (11) примет вид

$$\int_{\bar{r}_{\text{дет}}}^1 \left[ -\frac{m}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}} (1 - \bar{\rho}) + Q\bar{a} \left( \frac{1}{\bar{\rho}} - 1 \right) \right]^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min. \quad (14)$$

Варьируя по  $\bar{a}$  и взяв производную, получим следующее выражение:

$$\bar{a} = \frac{\frac{m}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}} \int_{\bar{r}_{\text{дет}}}^1 \left[ (1 - \bar{\rho}) \left( \frac{1}{\bar{\rho}} - 1 \right) \right] d\bar{\rho}}{\left[ Q \int_{\bar{r}_{\text{дет}}}^1 \left( \frac{1}{\bar{\rho}} - 1 \right)^2 d\bar{\rho} \right]}. \quad (15)$$

После интегрирования оно примет вид

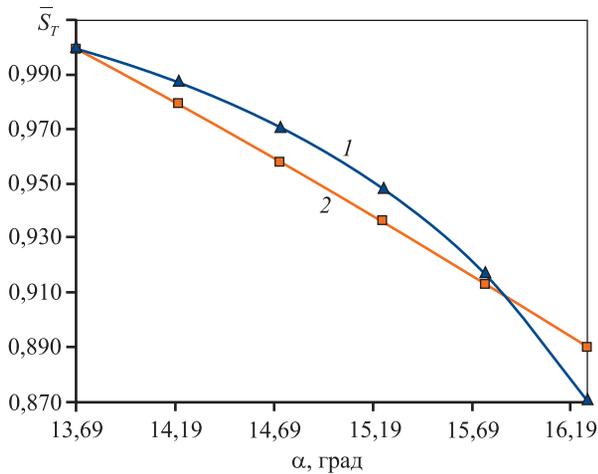
$$\bar{a} = \frac{-\frac{m}{1 - \bar{r}_{\text{дет}}} \left[ -\ln \bar{r}_{\text{дет}} - 2(1 - \bar{r}_{\text{дет}}) + 0,5 - \frac{\bar{r}_{\text{дет}}^2}{2} \right]}{Q(1/\bar{r}_{\text{дет}} + 2 \ln \bar{r}_{\text{дет}} - \bar{r}_{\text{дет}})}. \quad (16)$$

Определим относительную технологически возможную толщину детали по формуле

$$\bar{S}_T = 1 + Q(1 - \bar{r}_{\text{заг}}/\rho). \quad (17)$$

С использованием формул (3), (9), (12) и (16) получены значения  $m = 0,1$ ,  $\bar{\sigma}_{\rho k} = 0,3311$ ,  $Q = -0,7976$ ,  $a = -0,1497$  и построено распределение технологически возможной и заданной толщин выпуклой детали со следующими параметрами: больший радиус  $R_{\text{дет}} = 22,35$  мм; меньший —  $r_{\text{дет}} = 11,05$  мм; радиус кривизны детали в меридиональном направлении  $R_\rho = 1000$  мм. Деталь получена из заготовки с углом конусности  $\alpha_{\text{заг}} = 16,4^\circ$  при формообразовании с коэффициентом трения на внутренней поверхности заготовки  $f = 0,05$  и с учетом коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела  $\mu = 0,5$ .

Полученные данные позволили построить распределение относительной технологически возможной толщины детали вдоль очага деформации согласно предложенной методике (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение относительной технологически возможной при  $f=0,05$  и  $\mu=0,5$  (1) и относительной заданной (2) толщин тонкостенной выпуклой детали

**Fig. 2.** Distribution of relative technologically possible at  $f=0.05$  and  $\mu=0.5$  (1) and relative preset (2) thickness of a thin-walled convex part

## Моделирование процесса формообразования в программном комплексе LS-DYNA

С целью исключения ошибок при проектировании инструмента для перспективной реализации способа на изготовленной штамповой оснастке [24] применим метод моделирования формообразования в специализированных конечно-элементных программных комплексах. Для расчета технологических процессов используются различные программы, такие как LS-DYNA, ANSYS, Abaqus, QFORM, DEFORM и др. Несмотря на то, что исследованию пластического течения посвящено немало научной литературы, теоретические формулы могут быть выведены только для относительно простых процессов (гибки, вытяжки, осадки) и с существенными допущениями, а также заготовок простой формы (круглой, цилиндрической, квадратной). Однако при использовании заготовок сложной формы и разработке более совершенных технологий обработки металлов давлением (ОМД) такие формулы дают значительную погрешность, а приближенные методы сложны в освоении и поиске решения.

Решением указанной проблемы может быть применение программ, основанных на методе конечных элементов, например ANSYS/LS-DYNA, являющейся одной из лучших в своей области. Она предназначена для расчетов быстротекущих и динамических процессов и, кроме того, идеально

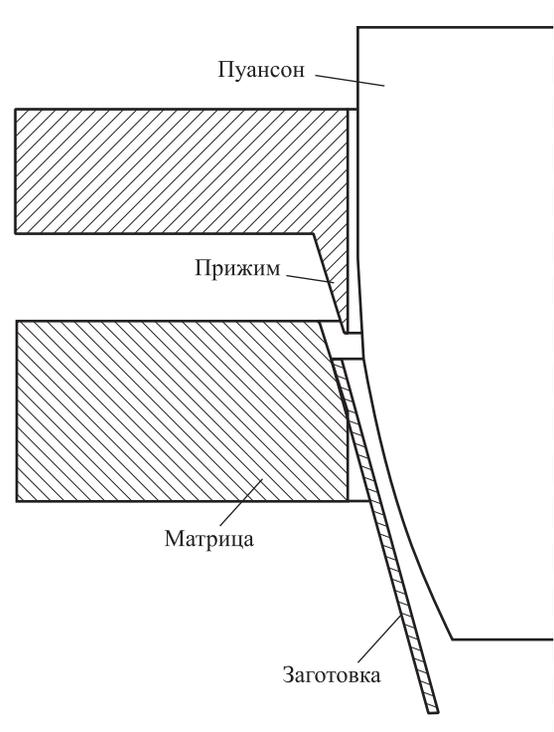
подходит для решения задач ОМД, включая холодную листовую штамповку. Программа позволяет выявить опасные зоны и участки модели, в которых возможно разрушение, и определить все необходимые параметры:

- напряженно-деформируемое состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени;
- энергетические параметры процесса;
- величины усилий и моментов, нормальных и касательных сил;
- контактные параметры;
- многое другое, что необходимо для понимания процессов, происходящих в заготовке.

В наши дни существует широкий выбор программ моделирования различных сценариев [25–31], которые успешно применяются в различных сферах машиностроения.

Необходимость решения поставленных задач именно в системе LS-DYNA объясняется в том числе возможностью расчета тонкостенных оболочек. Кинематическая схема моделируемого процесса изображена на рис. 3.

Геометрия заготовки и инструмента (прижим, матрица, пуансон) проектировалась в системе трехмерного моделирования АСКОН «Компас-3D»



**Рис. 3.** Кинематическая схема процесса отбортовки

**Fig. 3.** Kinematic diagram of flanging

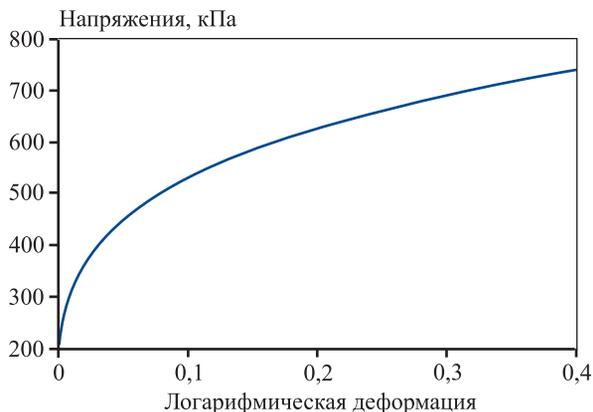


Рис. 4. Экспериментальная кривая упрочнения стали 12X18H10T

Fig. 4. Experimental hardening curve of 12Kh18N10T steel

[32] и экспортировалась в распространенном формате обмена данными между CAD/CAE приложениями — Iges. Непосредственно в ANSYS/LS-DYNA пуансону, матрице и заготовке был присвоен тип элемента — Shell, оболочечный элемент. Для узлов фланца заготовки было задано ограничение BOUNDARY\_SPC, запрещающее перемещение по осям и вращение вокруг них. Команда выполняет функции прижима и матрицы. Задаются граничные условия и ограничения степеней свободы пуансона, благодаря которым инструмент перемещается только по оси OZ. Коэффициент трения между пуансоном и заготовкой был равен 0,05. После позиционирования объектов по оси OZ для них строились правильная (четырёхугольная) сетка конечных элементов с длиной ребра 1 мм для заготовки и смешанная сетка с длиной ребра 2 мм для пуансона. В качестве модели материала пуансона и заготовки были выбраны жесткая модель MAT\_RIGID и поперечно-анизотропная — MAT\_TRANSVERSELY\_ANISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC соответственно.

Для задания свойств [33] материала заготовки (12X18H10T) была введена экспериментальная кривая упрочнения данной конструкционной стали, полученная при испытании на простое растяжение (рис. 4).

## Результаты

Для описания свойств материала тонкостенной заготовки толщиной  $S_{\text{заг}} = 0,3$  мм из стали 12X18H10T были введены следующие параметры:

- плотность стали — 7 920 кг/мм<sup>2</sup>;
- модуль упругости — 198 ГПа;

- коэффициент Пуассона — 0,29;
- коэффициент, учитывающий анизотропию трансверсально-изотропного материала заготовки — 0,5.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Для сравнительного анализа результатов моделирования выберем точки вдоль образующей осесимметричной детали (рис. 6) и построим зависимость, отражающую значения толщины в этих точках (рис. 7). Для наглядности добавим на график относительную заданную толщину детали, что позволит сделать вывод о полученном минимальном отклонении толщины детали от заданной, не превышающей 2,0 %.

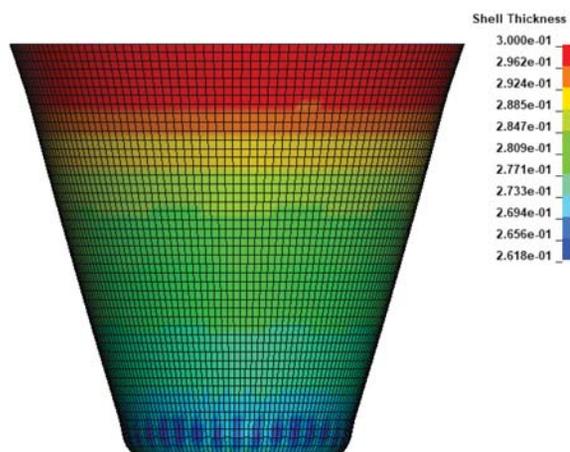


Рис. 5. Распределение толщины (мм) стенки осесимметричной детали

Fig. 5. Distribution of wall thickness (mm) of an axisymmetric part

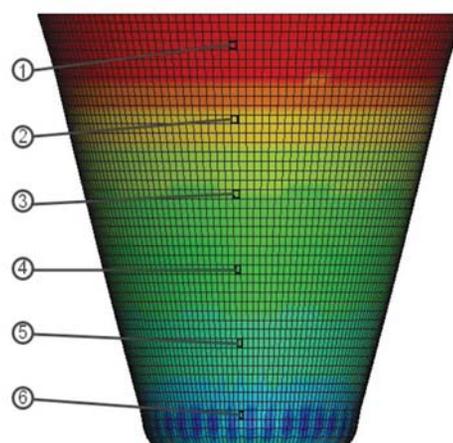
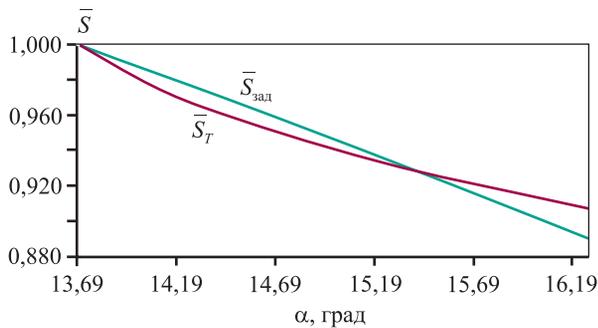


Рис. 6. Выбор точек по образующей осесимметричной детали

Fig. 6. Selection of points along the generatrix of an axisymmetric part



**Рис. 7.** Распределение относительных значений технологически возможной толщины (по результатам моделирования) и заданной толщины тонкостенной выпуклой детали

**Fig. 7.** Distribution of relative technologically possible thickness according to the results of simulation and relative preset thickness of a thin-walled convex part

## Выводы

По результатам исследования были сделаны следующие выводы.

1. Максимальное расхождение данных моделирования и теоретических не превышает 1,5 %. Минимальная разнотолщинность наблюдается при угле пуансона 15,36°, а максимальная — при 16,79° (см. рис. 7).

2. Сравнение результатов моделирования и теоретических исследований по предложенной методике указывает на их удовлетворительное согласование.

3. Было достигнуто необходимое распределение толщины (см. рис. б): ее уменьшение от больших радиусов к меньшим с минимальным отклонением от заданного значения.

## Список литературы/References

- Shanmuganatan S.P., Kumar V.S.S. Experimental investigation and finite element modeling on profile forming of conical component using Al 3003 (O) alloy. *Materials & Design*. 2012;36:564–569. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.066>
- Bambach M., Voswinkel H., Hirt G. A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming. *Procedia Engineering*. 2014;81:2305–2310. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.325>
- Попов В.Г., Ярославцев Н.Л. Жидкостные ракетные двигатели. М.: МАТИ, 2001. 171 с.
- Rezchikov A.F., Kochetkov A.V., Zakharov O.V. Mathematical models for estimating the degree of influence of major factors on performance and accuracy of coordinate measuring machines. *MATEC Web Conf*. 2017;129:01054. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901054>
- Cao T., Lu B., Ou H., Long H., Chen J. Investigation on a new hole-flanging approach by incremental sheet forming through a featured tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016;110:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.08.003>
- Григорьев А.В., Карачунский А.Д., Шингель Е.Г., Михайлов А.А. Способ изготовления полых осесимметричных изделий с фланцем: Авт. св-во 1636089 (СССР). 1991.
- Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
- You D., Cai D., Wang Y., Zhou F., Ruan Z. Novel hydromechanical reverse drawing method for thin-walled aluminum alloy sheet forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 120(5):3741–3756. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08936-4>
- Чумадин А.С., Ершов В.И., Ковалев А.Д., Дебердеев Е.М. Способ изготовления тонкостенных оболочек: Авт. св-во 1465152 (СССР). 1989.
- Яковлев С.С., Ремнев К.С. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2014;9:39–47. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-39-47>
- Yakovlev S.S., Remnev K.S. Folding when drawing axisymmetric parts from anisotropic material. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2014;9: 39–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-39-47>
- Song Y., Dai D., Geng P., Hua L. Formability of aluminum alloy thin-walled cylinder parts by servo hot stamping. *Procedia Engineering*. 2017;207:741–746. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.822>
- Frącz W., Stachowicz F., Trzepieciński T. Investigations of thickness distribution in hole expanding of thin steel sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2012;3:279–283. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.006>
- Непершин Р.И. Вытяжка тонкостенной конической оболочки из плоской заготовки. *Механика твердого тела*. 2010;1:139–153. Nepershin R.I. Thin-walled conical shell drawing from a plane blank. *Mechanics of solids*. 2010;45:111–122. <https://doi.org/10.3103/S0025654410010140>
- Wankhede P., Narayanaswamy N. G., Suresh K., Priyadarshini A. A portable device for single point strain analysis in sheet metal forming processes. *HardwareX*. 2022: e00371. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00371>

15. Dou W., Xu Z., Han Y., Huang F. A ductile fracture model incorporating stress state effect. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022: 107965. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107965>
16. Демьяненко Е.Г., Попов И.П. Проектирование технологических процессов формообразования тонкостенных осесимметричных деталей летательных аппаратов: Учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2014. 144 с.
17. Демьяненко Е.Г., Попов И.П. Технология листовой штамповки. Часть 1. Способы деформирования, основанные на процессах формовки, отбортовки и вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей. Самара: Изд-во СГАУ, 2013. 112 с.
18. Попов И.П. Направленное изменение толщины листовой заготовки в процессах пластического деформирования: Учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2006. 74 с.
19. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
20. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
21. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Аппроксимация кривых упрочнения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2004;(1):23–26. Dmitriev A.M., Vorontsov A.L. Approximation of metal hardening curves. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2004;(1):23–26. (In Russ.).
22. Лысов М.И., Закиров И.М. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.
23. Лысов М.И., Соснов Н.В. Формообразование деталей гибкой. М.: Машиностроение, 2001. 388 с.
24. Takuda H., Tanaka Y., Hatta N. Finite element analysis of forming limit in bore expanding of aluminium alloy sheets. *Archive of Applied Mechanics*. 1998;68(7):566–576. <https://doi.org/10.1007/s004190050187>
25. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
26. Radonjic R., Liewald M. New process design for reduction of springback by forming with alternating blank draw-in. *Procedia Manufacturing*. 2019;29:217–224. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.129>
27. Guan Y., Li C., Guo S., Lin P. A novel combined process of flaring-upsetting for forming end flanges on thin-walled tubes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;84:927–936. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.051>
28. Dewang Y., Purohit R., Tenguria N. A study on sheet metal hole-flanging process. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(4):5421–5428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.053>
29. Синь Л., Евсюков С.А., Чжунци Ю. Исследования процесса вытяжки в коническую матрицу. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019;9:513–520. Sin' L., Evsiukov S.A., Zhongqi Yu. Studies of the process of drawing into a conical matrix. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2019; 9:513–520. (In Russ.).
30. Кухарь В.Д., Малышев А.Н., Бессмертная Ю.В. Вытяжка низких прямоугольных коробок из профильных заготовок. *Черные металлы*. 2019;1:39–42. Kukhar' V.D., Malyshev A.N., Bessmertnaia Yu.V. Extraction of low rectangular boxes from profile blanks. *Chernye metally*. 2019;1:39–42. (In Russ.).
31. Сосенушкин Е.Н., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Татаринцев А.А., Сосенушкин А.Е. К вопросу о моделировании напряженно-деформированного состояния при обработке материалов давлением. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017;11(1):82–100. Sosenushkin E.N., Kadymov V.A., Ianovskaia E.A., Tatarintsev A.A., Sosenushkin A.E. On the issue of modeling the stress-strain state in the processing of materials by pressure. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2017;11(1):82–100. (In Russ.).
32. Большаков В.П., Чагина А.В. 3D-моделирование в КОМПАС-3D версий V17 и выше: Учебное пособие для вузов. СПб: Питер, 2021. 256 с.
33. Шинкин В.Н. Прямая и обратная нелинейная аппроксимация зоны упрочнения стали. *Черные металлы*. 2019; (3): 32–37. Shinkin V.N. Direct and inverse nonlinear approximation of the hardening zone of steel. *Chernye metally*: 2019;(3): 32–37.

## Информация об авторах

**Елена Геннадьевна Демьяненко** – д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением, вед. науч. сотрудник научно-исследовательской лаборатории пластического деформирования специальных материалов (НИЛ-37), Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва.

<https://orcid.org/0000-0003-2518-9762>

E-mail: e-dem@mail.ru

**Игорь Петрович Попов** – д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением, вед. науч. сотрудник НИЛ-37, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва.

<https://orcid.org/0000-0001-6497-0004>

E-mail: igr\_popov@mail.ru

**Алина Александровна Левагина** – лаборант НИЛ-37, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва.

<https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

E-mail: aline.levagina@yandex.ru

## Information about the authors

**Elena G. Demyanenko** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metal Forming, Leading Researcher of the Research Laboratory of Plastic Deformation of Special Material (RL-37), Samara National Research University.

<https://orcid.org/0000-0003-2518-9762>

E-mail: e-dem@mail.ru

**Igor P. Popov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metal Forming, Leading Researcher of RL-37, Samara National Research University.

<https://orcid.org/0000-0001-6497-0004>

E-mail: igr\_popov@mail.ru

**Alina A. Levagina** – Laboratory Assistant of RL-37, Samara National Research University.

<https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

E-mail: aline.levagina@yandex.ru

## Вклад авторов

**Е.Г. Демьяненко** – научное руководство, подготовка текста, проведение экспериментов, формулировка выводов.

**И.П. Попов** – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, корректировка выводов, проведение расчетов.

**А.А. Левагина** – проведение математического моделирования, проектирование оснастки, подготовка текста статьи.

## Contribution of the authors

**E.G. Demyanenko** – scientific guidance, wrote the manuscript, conducted experiments, formulated the conclusions.

**I.P. Popov** – formulated the main concept, set the goal and objectives of the study, revised the conclusions, performed the calculations.

**A.A. Levagina** – mathematical simulation, tooling design, wrote the manuscript.

*Статья поступила в редакцию 14.04.2023, доработана 12.05.2023, подписана в печать 15.05.2023*

*The article was submitted 14.04.2023, revised 12.05.2023, accepted for publication 15.05.2023*