

УДК 621.983.7

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ШТАМПЕ С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ

©2012 И. П. Попов, Е. С. Нестеренко, М. В. Зимарев

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Предложен новый способ штамповки тонкостенных конических деталей в штампе с упругим элементом. При этом условия формообразования значительно облегчены из-за ликвидации реактивных касательных напряжений на поверхности контакта детали и упругого элемента. Данный способ позволит увеличить высоту штампуемых деталей, предотвратить потери устойчивости штампуемой детали, повысить предельный суммарный коэффициент формоизменения.

Упругие свойства, разнотолщинность, упругий элемент, коэффициент формоизменения, потеря устойчивости, раздача, реактивные касательные напряжения.

В современных летательных аппаратах широкое применение нашли тонкостенные конические конструкции, которые получают из трубных заготовок: баллоны, обтекатели, переходники, компенсаторы, тяги управления и т.д. Используются конические детали не только в авиационной технике, но и других отраслях промышленности, например, в нефтегазодобывающей, химической, пищевой и др.

Изготовление тонкостенных конических деталей возможно за счёт использования следующих схем листовой штамповки: обжима, раздачи и обжима-раздачи трубной заготовки; вытяжкой и последующим обжимом.

Наиболее распространённым и простым способом получения данных деталей является обжим трубной заготовки. Недостатком этого способа является низкая высота штампуемых деталей, обусловленная тем, что в процессе формовки невозможно получить большие степени деформирования. Это объясняется тем, что в процессе штамповки краевая часть трубной заготовки обжиму не подвергается, т.е. не участвует в формообразовании. Кроме того, при достижении предельных степеней деформирования появляется вероятность потери устойчивости в результате действия напряжений, воз-

никающих от реактивных сил трения между матрицей и деталью [1].

Для устранения перечисленных недостатков предлагается для изготовления тонкостенных конических деталей совместить обжим трубной заготовки с раздачей и осуществлять данный процесс в штампе с упругим элементом.

Данный способ позволяет значительно расширить технологические возможности за счёт увеличения высоты штампуемых деталей.

Указанная цель достигается тем, что в процессе формовки производят уменьшение диаметра открытого торца детали путем приложения к её наружной боковой поверхности равномерно распределённого усилия, направленного вдоль образующей рабочей поверхности матрицы. Кроме того, происходит увеличение коэффициента деформирования за счёт совместного применения операций обжима и раздачи.

Упругий элемент выполнен из ленты, свёрнутой в конус. Он может быть изготовлен также из материала с более низким модулем упругости и более высоким пределом пропорциональности по сравнению со штампуемым материалом.

Схема процесса представлена на рис. 1.

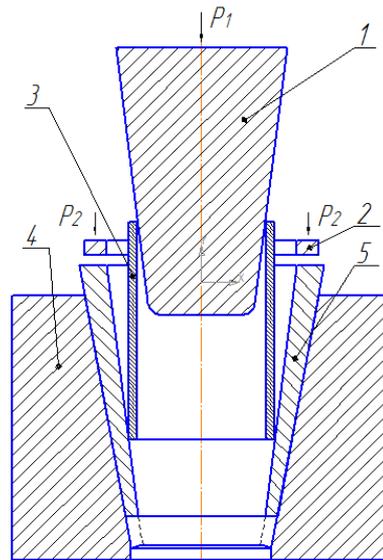


Рис. 1. Схема процесса штамповки с использованием упругого элемента:
1-главный пуансон, 2- вспомогательный пуансон, 3-заготовка, 4-матрица, 5-упругий элемент

При приложении усилия к главному пуансону 1 последний передаёт усилие заготовке 3. При этом одновременно протекают две операции: обжим и раздача.

После того, как заготовка полностью вошла в матрицу 4, к упругому элементу прикладывается ударная нагрузка посредством вспомогательного пуансона 2. При ударах начинается совместное деформирование заготовки с упругим элементом 5. При совместном деформировании заготовки и упругого элемента условия формообразования значительно облегчены из-за ликвидации на её наружной поверхности реактивных касательных напряжений, которые переносятся на поверхность контакта между упругим элементом и матрицей.

Силы трения, возникающие между заготовкой и упругим элементом, играют активную роль, так как к наружной боковой поверхности прикладывается равномерно распределённое усилие, направление которого совпадает с направлением течения материала, в результате чего заготовка затягивается упругим элементом в очаг пластического деформирования.

Это приводит к предотвращению потери устойчивости заготовки и к увеличению суммарного коэффициента формоизменения.

При расчёте напряжений, возникающих в заготовке во время деформирования, использовалось обобщённое уравнение равновесия [2]:

$$r \frac{ds_r}{dr} + s_r - s_q - \frac{mr}{\sin a} \left(\frac{s_r}{R_r} + \frac{s_q}{R_q} \right) \quad (1)$$

условие пластичности для обжима:

$$\sigma_\theta = -\sigma_s; \quad (2)$$

условие пластичности для раздачи:

$$\sigma_\theta = \sigma_s + \sigma_p. \quad (3)$$

Напряжённо-деформированное состояние рассматривалось на двух этапах: 1-й – без воздействия на упругий элемент ударной нагрузки; 2-й – с воздействием на упругий элемент ударной нагрузки.

На каждом этапе рассматривалось по четыре участка: обжима, раздачи и два переходных участка свободногогиба. На рис. 2 показана деформируемая заготовка, на первом этапе разбитая на участки.

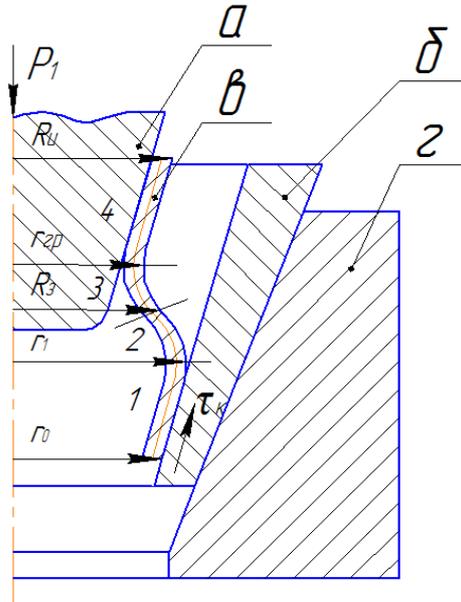


Рис. 2. Деформируемая заготовка на первом этапе:
 1 – участок обжима, 2 – первый участок свободногогиба, 3 – второй участок свободногогиба,
 4 – участок раздачи;
 а – пуансон, б – упругий элемент, в – заготовка, г – матрица

На первом этапе формулы для определения напряжений в заготовке являются стандартными, их получают при подстановке в уравнение равновесия (1) условий пластичности (2) и (3). Соответственно напряжения на первом этапе на отдельных участках определяются по формулам:

для участка обжима:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left(1 + \mu \operatorname{tg} \alpha \right) \left(1 - \frac{r_0}{\rho} \right); \quad (4)$$

для первого участка свободногогиба:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left[\begin{aligned} & 1 - \frac{r_1}{\rho} - (1 + \mu \operatorname{tg} \alpha) \left(1 - \frac{r_0}{r_1} \right) \frac{r_1}{\rho} - \\ & - \frac{S}{4R_p} \frac{r_1}{\rho} \end{aligned} \right]; \quad (5)$$

для второго участка свободногогиба:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left[\left(1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left(1 - \left(\frac{r_{rp}}{R_{и}} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right) - \frac{S}{4R_p} \right]; \quad (6)$$

для участка раздачи:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R_{и}} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right]. \quad (7)$$

Отличие второго этапа от первого заключается в том, что силы трения, возникающие между заготовкой и упругим элементом, играют активную роль и способствуют деформированию заготовки.

Для участка обжима уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta + \frac{\mu\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_p}{R_p} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) \quad (8)$$

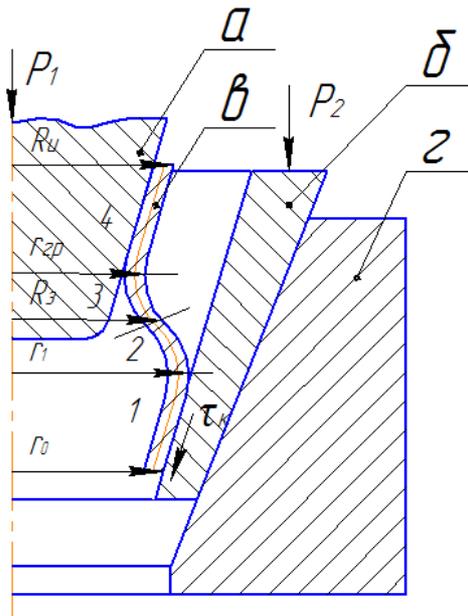


Рис. 3. Деформируемая заготовка на втором этапе:
 1 – участок обжима, 2 – первый участок свободногогиба, 3 – второй участок свободногогиба,
 4 – участок раздачи;
 а – пуансон, б – упругий элемент, в – заготовка, г – матрица

Из выражений (8) и (2) напряжения на втором этапе для участка обжима определяются по формуле:

$$s_r = -s_s(1 - m \operatorname{ctg} \alpha) \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \quad (9)$$

Напряжения на других участках определяются по формулам (5), (6), (7) как и для первого этапа.

Распределение напряжений s_r по длине образующей детали показано на рис. 4.

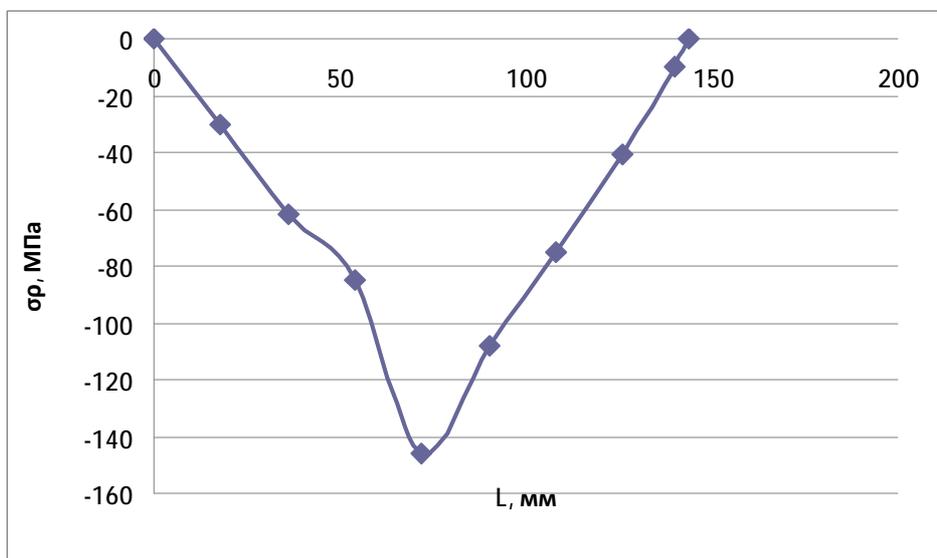


Рис. 4. Распределение напряжений s_r по длине образующей детали

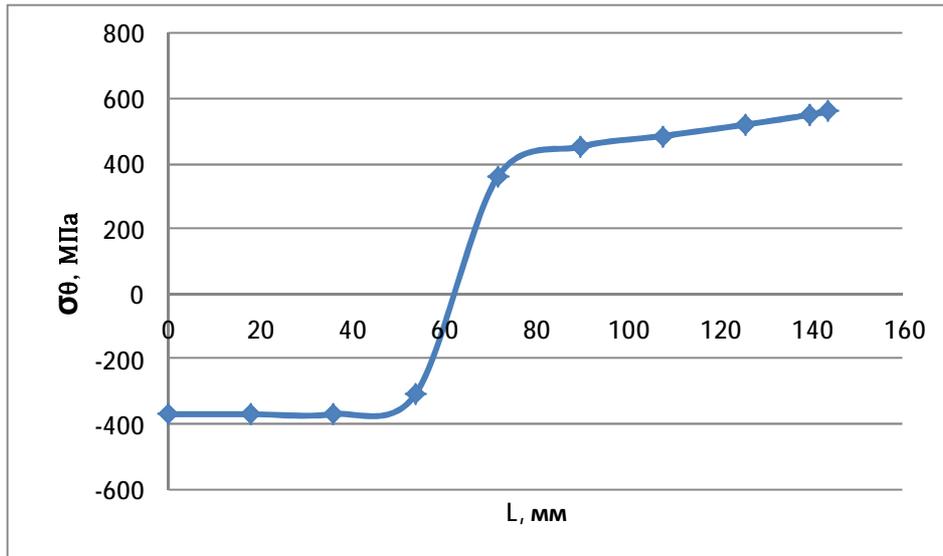


Рис. 5. Распределение напряжений S_q по длине образующей детали

Распределение напряжений S_q по длине образующей детали показано на рис.5. В итоге из-за ликвидации на наружной поверхности заготовки реактивных касательных напряжений и действия активных сил трения происходит увели-

чение предельного коэффициента формообразования. На рис. 6 представлен график зависимости максимальных напряжений внутри заготовки от суммарного коэффициента формообразования.

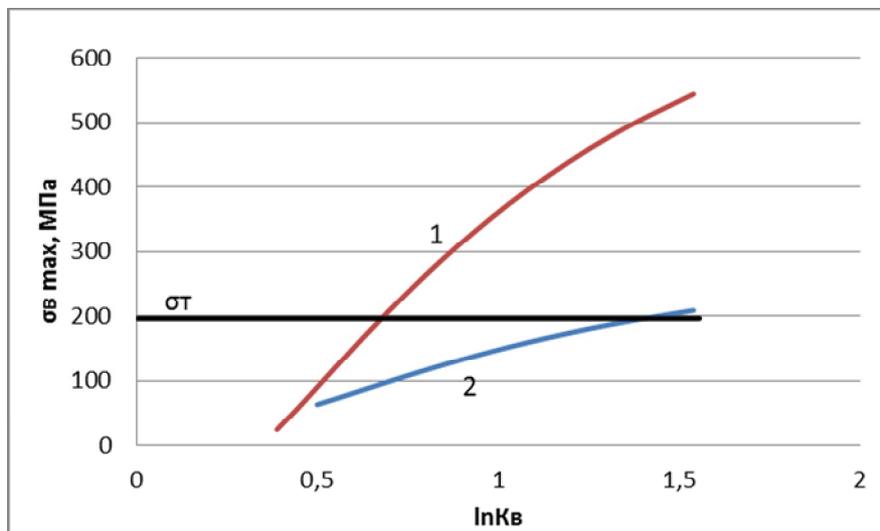


Рис. 6. График зависимости максимальных напряжений внутри заготовки от суммарного коэффициента формообразования: 1 – для процесса без упругого элемента; 2 – для процесса с использованием упругого элемента

Из графика видно, что применение упругого элемента в конструкции штампа позволит увеличить суммарный коэффи-

циент формообразования примерно в два раза.

Технологические параметры процесса

Размеры трубной заготовка из стали 12x18н10т для совмещенного процесса обжима и раздачи следующие:

H (высота заготовки) = 150 мм;

d (внешний диаметр заготовки) = 100 мм;

S_0 (толщина стенки) = 6 мм.

Размеры упругого элемента, матрицы и пуансонов определяются исходя из геометрических размеров отштампованной детали.

Наибольший и наименьший внешние диаметры готовой детали определяются исходя из используемых коэффициентов обжима и раздачи и размеров заготовки по формулам [3]:

$$D_n = dk_{разд}; \quad (10)$$

$$d_n = \frac{d}{k_{обж}}. \quad (11)$$

Учитывая применяемые коэффициенты раздачи и обжима для стали 12x18н10т ($K_{обж}=1,25$; $K_{разд}=1,4$), наибольший и наименьший внешние диаметры готовой детали: $D_n = 140$ мм; $d_n = 80$ мм.

Высота отштампованной детали находится из условия равенства объёма заготовки и готовой детали:

$$H_k = 3 \frac{pr_{заг.н}^2 H - pr_{заг.в}^2 H}{p(R_n^2 + R_n r_n + r_n^2 - R_г^2 - R_г r_г - r_г^2)}, \quad (12)$$

где H_k - высота отштампованной детали, мм; H - высота заготовки, мм; $r_{заг.н}$ - наружный радиус заготовки, мм; $r_{заг.в}$ - внутренний радиус заготовки, мм; R_n - наибольший наружный радиус детали, мм; r_n - наименьший наружный радиус детали, мм; $R_г$ - наибольший внутренний радиус детали, мм; $r_г$ - наименьший внутренний радиус детали, мм.

Зная высоту и диаметры готовой детали, можно определить угол конусности детали:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{R_n - r_n}{H_k} \right) \quad (13)$$

где α - угол конусности детали, град.

В соответствии с размерами готовой детали подбираются размеры упругого элемента:

$$R_{упр.эл.в} \geq R_n; \quad (14)$$

$$r_{упр.эл.в} \leq r_n, \quad (15)$$

где $R_{упр.эл.в}$ - наибольший внутренний радиус упругого элемента, мм; $r_{упр.эл.в}$ - наименьший внутренний радиус упругого элемент, мм.

Высота упругого элемента $H_{упр.эл}$ больше высоты готовой детали на 20-30 мм. Наибольшая толщина упругого элемента $S_{упр} = 19$ мм, наименьшая толщина $S_{упр} = 8$ мм.

Размеры главного пуансона должны обеспечивать возможность получения необходимой детали:

$$H_{п} > H_k; \quad (16)$$

$$R_{п} > R_г; \quad (17)$$

$$r_{п} < r_г, \quad (18)$$

где $H_{п}$ - высота пуансона, мм; $R_{п}$ - наибольший диаметр пуансона, мм; $r_{п}$ - наименьший диаметр пуансона, мм.

Размеры матрицы:

$$R_M = R_{упр.эл.в} + S_{упр}; \quad (19)$$

$$r_M < r_{упр.эл.в} + S_{упр}; \quad (20)$$

$$H_M > H_{упр.эл.}, \quad (21)$$

где H_M - высота матрицы, мм; R_M и r_M - наибольший и наименьший радиусы матрицы, мм.

В результате расчётов были получены размеры:

готовой детали ($D_n = 140$ мм; $d_n = 80$ мм, $H_k = 135,6$ мм, $\alpha = 12,5^\circ$, $S_0 = 6$);

упругого элемента ($R_{\text{упр.эл.в}} = 70$ мм, $r_{\text{упр.эл.в}} = 37$ мм, $H_{\text{упр.эл.в}} = 165$ мм, $S_{\text{упр}} = 19$ мм, $S_{\text{упр}} = 8$ мм);
 пуансона ($H_{\text{п}} = 155$ мм, $R_{\text{п}} = 75$ мм, $r_{\text{п}} = 35$ мм);
 матрицы ($R_{\text{м}} = 89$ мм, $r_{\text{м}} = 40$ мм).

Общее усилие деформирования заготовки P_1 складывается из усилия обжима и усилия раздачи [3]:

$$P_1 = P_{\text{обж}} + P_{\text{разд}} \quad (22)$$

Усилие обжима определяется по формуле [3]:

$$P_{\text{обж}} = gpdSs_{\alpha 0}, \quad (23)$$

где $g = 1,1 \div 1,2$; d – диаметр заготовки, мм; S_0 – толщина заготовки, мм.

Напряжение $s_{\alpha 0}$ для процесса обжима определяется по формуле [3]:

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_{\text{s.ср}}}{2} (1 + \mu \text{ctg} \alpha) \left(1 - \frac{d_n}{d} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{d}{d_n}} \right) \times (3 - 2 \cos \alpha). \quad (24)$$

Напряжение $s_{\text{s.ср}}$ определяется по формуле [3]:

$$s_{\text{s.ср}} = 0,5 \left[s_T + \frac{s_{\epsilon}}{n^n} \left(\ln \frac{d_n}{d} \right)^n \exp n \right], \quad (25)$$

где s_T – предел текучести;

s_{ϵ} – временное сопротивление разрыву, МПа;

d_n – наименьший наружный диаметр детали, мм;

$n = \ln(1 + d_p)$ – показатель деформационного упрочнения.

Усилие раздачи определяется по формуле [3]:

$$P_{\text{разд}} = \gamma \pi d S \sigma_{\alpha 0}. \quad (26)$$

Напряжение $\sigma_{\alpha 0}$ для процесса раздачи определяется по формуле [3]:

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{4} \left(\frac{D_n}{d} + 1 \right) \times \left[\left(\frac{D_n}{d} - 1 \right) (1 + \mu \text{ctg} \alpha) + 2 \sqrt{\frac{S_0}{D_n}} \sin \alpha \right] \times \left(1 + \sqrt{\frac{d}{D_n}} \right) (3 - 2 \cos \alpha), \quad (27)$$

где D_n – наибольший наружный диаметр детали, мм.

Усилие P_2 прикладываемое к упругому элементу, определяется по следующей формуле:

$$P_2 = s_{r(s_T)} S_T, \quad (28)$$

где S_T – площадь торцевой поверхности упругого элемента;

$s_{r(s_T)}$ – напряжения, действующие на торцевой поверхности упругого элемента.

Штамповую оснастку целесообразно изготавливать из инструментальных сталей, предназначенных для штампов холодной штамповки. Для упругого элемента применяли сталь 40, подвергая термообработке: отжиг при температуре 840..860 °С - 1 час, охлаждение в печи; полная закалка в воду при 840..860 °С - 20 мин; высокий отпуск при 550..600 °С - 20 мин, далее охлаждение на воздухе; азотирование при 550..600 °С - 55 часов (для повышения стойкости).

Для проверки теоретических расчётов оснастки процесс был смоделирован в программе Deform-2D. (марка материала – сталь 12х18н10т; $D_n = 140$ мм; $d_n = 80$ мм; $S_0 = 6$ мм).

Результаты расчётов показали, что максимальная интенсивность напряжений в упругом элементе $s_{i \text{max}} = 15,8$ МПа; напряжения внутри упругого элемента не превышают предела упругости материала (ст. 40), который равен 360 МПа, что говорит о том, что упругий элемент деформируется только в упругой зоне.

Также в результате моделирования была проанализирована разнотолщинность готового изделия. Был построен график изменения толщины стенки по

длине образующей конической детали, который представлен на рис. 7.

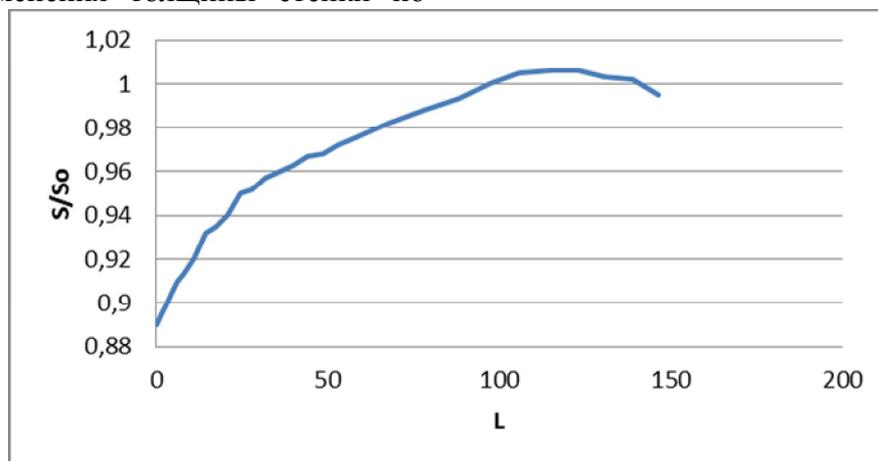


Рис. 7. Изменение толщины стенки детали по длине образующей (материал заготовки - сталь 12х18н10т; $S_0=6$ мм)

Были определены максимальная и минимальная толщина стенки. Исходя из этого, определили относительную разнотолщинность по формуле:

$$\Delta S_{\text{отн}} = 100 \cdot \Delta S / S_{\text{cp}} = 100(S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) / S_{\text{cp}}. \quad (29)$$

Полученная разнотолщинность составила 11-12%.

Кроме того, в результате моделирования процесса было подтверждено, что при предельных степенях деформирования потери устойчивости заготовки не происходит.

Библиографический список

1. Пат. 1132407 СССР, МПК В21 Д22/28. Способ штамповки конусных деталей [Текст] / И. П. Попов, В. П. Чистяков, В. Д. Маслов, Г. А. Топоров, 1983.

2. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов [Текст] / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

1. Семёнов, Е. И. Ковка и штамповка [Текст] / Е. И. Семёнов - М.: Машиностроение, 1987. - 544 с.

METHOD OF PRODUCING THIN-WALLED CONICAL PARTS IN A DIE WITH AN ELASTIC ELEMENT

©2012 I. P. Popov, E. S. Nesterenko, M. V. Zimarev

Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

A new way forming of thin-walled conical parts in a die with an elastic element is proposed. In this method, the conditions of formation are considerably facilitated due to eliminating the reactive tangential stresses on the surface of the contact of the part and the elastic element. That will make it possible: to increase the height of stamped parts, to prevent losses of stability of the stamped part, to increase the maximum coefficient of forming.

Elastic properties, variation in thickness, elastic element, coefficient of forming, loss of stability, expansion, reactive tangential stresses.

Информация об авторах

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nesterenko77@mail.ru. Область научных интересов: листовая штамповка.

Нестеренко Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nesterenko77@mail.ru. Область научных интересов: листовая штамповка.

Зимарев Максим Владимирович, бакалавр техники и технологии по направлению «Металлургия», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: max.zim@mail.ru. Область научных интересов: листовая штамповка.

Popov Igor Petrovich, doctor of technical science, professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: nesterenko77@mail.ru. Area of research: sheet forming.

Nesterenko Yelena Sergeyevna, candidate of technical sciences, associate professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: nesterenko77@mail.ru. Area of research: sheet forming.

Zimarev Maxim Vladimirovich, bachelor of engineering and technology in metallurgy, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: max.zim@mail.ru. Area of research: sheet forming.