

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛИ «ПОЛУСФЕРА» В ШТАМПЕ С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ

© 2017 г. **Е.С. Нестеренко, Ф.В. Гречников**

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева (Самарский университет)

Статья поступила в редакцию 07.04.17 г., доработана 26.04.17 г., подписана в печать 03.05.17 г.

Представлен способ получения деталей типа полусферы в штампе, где образующей поверхностью детали является матрица. Это достигается за счет использования в конструкции штампа упругого стального элемента, расположенного по контуру пуансона. Данная схема процесса позволяет совместить в одном штампе две операции: вытяжку и калибровку. Калибровка при вытяжке сферообразных деталей необходима из-за того, что в заготовке образуется большой участок, свободный от контакта с пуансоном и матрицей, на котором заготовка теряет устойчивость и начинают образовываться гофры. Упругий элемент, изготовленный из пружинной стали и расположенный по контуру жесткого пуансона, калибрует деталь в конечной стадии вытяжки. В работе представлена схема процесса штамповки для полусферических деталей с относительной толщиной $S' = S/D_0 \cdot 100 \% = 1,5 \pm 0,15$. Для оценки технологических параметров использована инженерная методика. Проведены расчеты геометрических параметров упругого элемента из стали 60ГС для вытяжки детали в виде полусферы из алюминиевого сплава АМгб толщиной от 0,5 до 10 мм. Определена величина зазора между пуансоном и упругим элементом. Рассчитаны максимальные напряжения, возникающие в упругом элементе в процессе штамповки, и выявлено, что он пластически не деформируется. Предложено использовать упругий элемент для получения деталей с точными геометрическими размерами и компенсации упругого пружинного эффекта при изготовлении.

Ключевые слова: деформация, гофрообразование, полусфера, вытяжка, упругое пружинение, опасное сечение, пластическая деформация, упругий элемент, сопротивление материала.

Нестеренко Е.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Самарского университета (443086 Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: nesterenko77@mail.ru.

Гречников Ф.В. – докт. техн. наук, акад. РАН, проф., зав. кафедрой ОМД Самарского университета. E-mail: gretch@ssau.ru.

Для цитирования: *Нестеренко Е.С., Гречников Ф.В.* Расчет параметров процесса вытяжки детали «полусфера» в штампе с упругим элементом // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 4. С. 62–68.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-62-68.

Nesterenko E.S., Grechnikov F.V.

Calculating parameters of hemisphere part drawing in the die with an elastic element

The paper provides a method to obtain hemisphere part in a die where the part surface is formed by the counter die. This is due to the tool design with a steel elastic element placed around the punch. Such process scheme allows for two different processes combined in one tool: drawing and calibration. Drawing sphere-like parts requires calibration since the part has a large area that is not in contact with the punch and die where the part loses stability and starts to buckle. The elastic element made of spring steel and placed around the hard punch calibrates part at the final drawing stage. The paper provides a forming scheme to obtain hemisphere parts with a relative thickness $S' = S/D_0 \cdot 100 \% = 1,5 \pm 0,15$. Process parameters are evaluated using the engineering method. Geometrical parameters are calculated for the Steel 1060 elastic element for hemisphere part drawing of aluminum alloy 5056 with a thickness of 0,5 to 10 mm. The size of a gap between the punch and elastic element is determined. Maximum stresses occurring in the elastic element when forming are calculated. It is found that the elastic element has no plastic deformation. It is proposed to use the elastic element to produce parts with accurate geometrical dimensions and compensate elastic restitution.

Keywords: deformation, buckling, hemisphere, drawing, elastic restitution, weakest section, plastic flow deformation, elastic element, material strength.

Nesterenko E.S. – Cand. Sci. (Tech.), Associate professor, Department of Metal Forming, Samara University (443086, Russia, Samara, Moscovskoe shosse, 34). E-mail: nesterenko77@mail.ru.

Grechnikov F.V. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. of RAS, Head of Department of Metal Forming, Samara University. E-mail: gretch@ssau.ru.

Citation: *Nesterenko E.S., Grechnikov F.V.* Raschet parametrov protsessy vytyazhki detali «polusfera» v shtampe s uprugim elementom. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2017. No. 4. P. 62–68. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-62-68.

Введение

При изготовлении полушфер методами холодной листовой штамповки встречаются трудности, связанные с такими явлениями, как упругая отдача, неравномерность толщины и потеря устойчивости изделия. В общем случае уменьшение упругой отдачи при холодной штамповке сферических днищ на прессах достигается вследствие увеличения степени и равномерности пластических деформаций [1–4].

Создавая условия, обеспечивающие минимальную степень пластических деформаций при известной способности штампуемого материала к упрочнению и заданной относительной глубине днища (H/d), можно получить минимальные упругие деформации днища [1–3]. Однако полностью исключить упругую отдачу при изготовлении сферических деталей на прессах вследствие различной интенсивности сил внешнего трения невозможно.

Многочисленные исследования этого явления учеными и производственный опыт показывают, что на величину упругой отдачи оказывают влияние следующие факторы [4]:

- способность штампуемого материала к упрочнению;
- условия внешнего трения в различных зонах очага деформации;
- физико-механическая природа смазочного материала;
- толщина материала и относительная глубина днища (H/d).

Распространенные до недавнего времени приближенные методики корригирования штампов весьма не эффективны и требуют повышенного количества доработок штамповой оснастки [5].

Из-за деформаций, возникающих в заготовке при вытяжке, происходит изменение толщины стенок деталей: наибольшее утонение составляет 10–15 %, а утолщение у края достигает 15–20 % от исходной толщины материала [6, 7]. На рис. 1 показаны эпюры относительного утонения стенок сферических днищ.

Утонение стенки снижает прочность днища, поэтому эта величина для деталей ответственного назначения строго регламентирована техническими условиями (до 10 %). Часто приходится преодолевать серьезные трудности, чтобы получить днище с допустимым утонением стенки [2].

При штамповке тонкостенных деталей $S_0/D_0 \times 100 < 1,0$ (где S_0 и D_0 — толщина и диаметр исход-

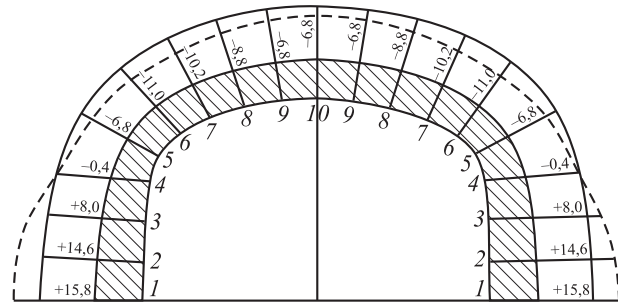


Рис. 1. Изменение толщины стенки штампованного днища

Указанные значения соответствуют относительной деформации по толщине ϵ_r , %

ной заготовки) с целью увеличения сил внешнего трения на пуансоне и, вследствие этого, уменьшения величины утонения стенки днища применяют штамповку заготовки с противодавлением эластичной, жидкостной или смешанной средой [8].

При прямой вытяжке эластичным пуансоном в жесткую матрицу может происходить утяжка фланца. Это наиболее характерно для днищ с параметром $S_0/D_0 \cdot 100 < 1,5$. В таких случаях применяют жесткий прижим в сочетании с эластичным пуансоном либо специальные жесткие прижимные кольца для исключения неравномерного вытягивания заготовки в жесткую кольцевую матрицу эластичным пуансоном [12, 13].

В ходе вытяжки в металле возникают растягивающие и сжимающие напряжения. При определенных геометрических соотношениях заготовка под действием преобладающих напряжений сжатия теряет устойчивость и начинает выпучиваться, образуя на некоторых участках складки (гофры), появление которых нарушает нормальный ход процесса вытяжки и часто приводит к браку [10–13].

Потеря устойчивости может быть различна по внешним признакам и природе ее образования:

- гофрообразование — равномерные по всему периметру заготовки гофры или волнистости (при незначительном отношении высоты гофра к его длине);
- выпучины (вспучины) — местные всплески на поверхности днища;
- складки — гофры или отдельные выпучины (вспучины), у которых высота волны (всплеска) приближается к длине волны [14].

Исследования потери устойчивости заготовки в процессе формообразования оболочковых деталей типа днищ остаются достаточно актуальными,

и прежде всего, с точки зрения поиска критериев оценки возможности протекания процесса в оптимальных условиях без гофрообразования.

Чтобы расширить технологические возможности процесса вытяжки, стараются уменьшить тангенциальные напряжения сжатия на свободном участке заготовки между ее контактными участками с пуансоном и матрицей за счет увеличения меридиональных растягивающих напряжений путем повышения усилия прижима или применения устройства перетяжных порогов, т.е. за счет мероприятий, затрудняющих перемещение фланца заготовки в полость матрицы [15–17]. Однако указанные меры неизбежно ведут к увеличению местных утонений стенки днища, вследствие чего их можно применять только в отдельных случаях и ограниченно [1–6].

В случаях, если выпучины вызываются изгибающими моментами, при вытяжке применяют калибровку [1]. Для этой же цели используют глухой штамп, т.е. штамп с матрицей, конфигурация которой соответствует форме наружной поверхности днища, однако он имеет большую массу и сложен в изготовлении. А с увеличением относительного диаметра заготовки высота складок возрастает, и при калибровке получается зажим металла [1–5].

В исключительных случаях, когда необходимы особотонкостенные днища из специальной стали или сплава, может быть применена вытяжка с прокладками [1]. Заготовку сваривают по кромке с более толстой заготовкой — прокладкой из низкоуглеродистой стали. Сдвоенную заготовку штампуют по обычной технологии, при этом основная заготовка размещается сверху со стороны пуансона. Применяя две прокладки, располагаемые с обеих сторон основной заготовки, можно отштамповать весьма тонкостенные днища [12]. Серьезный недостаток такой технологии заключается в том, что после штамповки каждой детали прокладки выбрасываются, что влечет за собой перерасход металла в 3–12 раз [18].

Формообразование тонкостенных и особотонкостенных днищ сопровождается интенсивным гофрообразованием сжаторастянутой зоны заготовки. Это объясняется тем, что при штамповке сферообразной детали практически большая часть заготовки остается не прижатой к рабочим частям инструмента (это особенно характерно для жестких штампов) [18]. В таком случае штамповка осуществляется за несколько переходов путем пред-

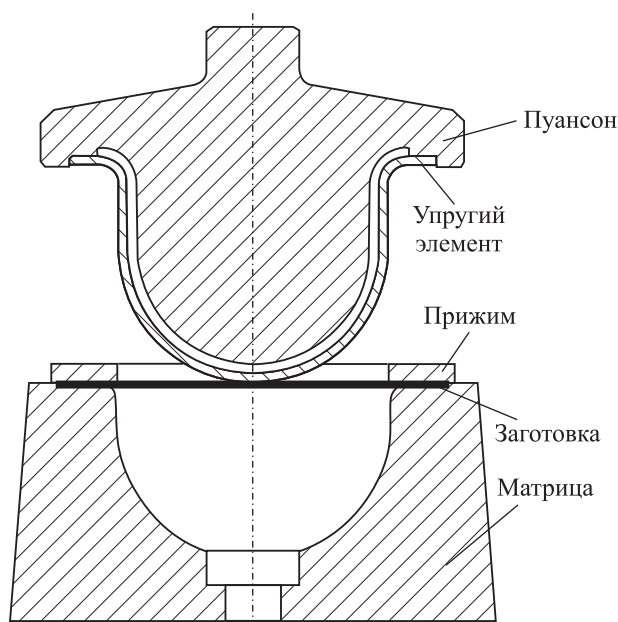


Рис. 2. Схема процесса в начальном положении

варительного набора металла и последующего придания детали окончательной формы [18].

Уменьшения разнотолщинности по образующей полусферы и упругой отдачи можно добиться за счет использования упругих свойств штамповой оснастки, в частности в инструментальных штампах для процессов вытяжки, формовки, обжима, раздачи и гибки [19, 20].

На рис. 2 представлена схема процесса штамповки с учетом упругих свойств штамповой оснастки. При ее использовании повышается точность геометрии детали, уменьшается гофрообразование, равномерно распределяются деформации в заготовке, снижаются разнотолщинность и утонение в опасном сечении и сокращается время технологического процесса в целом.

Таким образом, целью данной работы является разработка схемы процесса вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей типа днищ в штампе с упругим элементом на пуансоне.

Методика исследований

В данной работе будем считать относительно тонкостенными детали с толщиной $S' = S_0/D_0 \times 100\% = 1,5 \pm 0,15$, а толстостенными — с $S' = 10,0 \pm 5,0$ [2]. Для расчета технологических параметров используем инженерную методику [2].

Для решения данной задачи необходимо сделать ряд допущений:

- материал заготовки изотропен;
- схема напряженного состояния считается плоской;
- трение подчиняется закону Амонтона—Кулона [1—4]:

$$\tau_k = f_{\text{тр}} q_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где τ_k — касательное напряжение, действующее на контактной поверхности и вызываемое силами трения, МПа; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения; $q_{\text{пр}}$ — нормальное давление, действующее на заготовку со стороны прижима, МПа.

Известно, что при деформации вытяжкой внешний край заготовки несколько утолщается. Поэтому зазор между пуансоном и матрицей вытяжных штампов обычно делается равным максимальной толщине детали на кромке [1].

Наибольшее относительное утолщение внешней кромки заготовки после вытяжки под влиянием тангенциальных напряжений сжатия составляет [1]

$$S_k/S_0 = \sqrt{D_0/d}, \quad (2)$$

отсюда

$$S_k = S_0 \sqrt{R_0/r} = S_0 \sqrt{D_0/d} = S_0 \sqrt{k}, \quad (3)$$

где $k = D_0/d$ — степень вытяжки, а при вытяжке деталей сферической формы его величина всегда постоянна и для любого диаметра равна $k = 1,4$; D_0 — диаметр заготовки, мм; d — диаметр детали, мм; S_0 — толщина исходной заготовки, мм; S_k — толщина кромки фланца, мм.

Тогда зазор между матрицей и пуансоном равен

$$Z = 1,18S_0. \quad (4)$$

Для исключения потери устойчивости заготовки на фланце необходимо использовать прижим. В большинстве случаев значения давлений устанавливаются экспериментально при отработке технологии штамповки первых деталей. Предварительный расчет усилий прижима проводится по формуле [1, 2]

$$Q = q_{\text{пр}} F_{\text{фл}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{фл}}$ — площадь заготовки, находящейся под прижимом.

Усилие вытяжки определяется по выражению [1]

$$P_B = \pi d S_0 \sigma_B k_1, \quad (6)$$

где σ_B — предел прочности материала заготов-

ки, МПа; $k_1 = 1,8$ — коэффициент, зависящий от коэффициента вытяжки [1].

Для получения эффекта калибровки на завершающем этапе штамповки, опираясь на производственный опыт, следует увеличить усилие вытяжки в 5 раз [1].

Для заданной работоспособности и износостойкости упругого элемента на протяжении всего процесса вытяжки необходимо определить форму и размеры упругого элемента. Исходные данные следующие:

- вытягиваемая деталь осесимметричная;
- прижим выполнен в виде кольца;
- матрица закрытая, имеет форму изготавливаемой детали;
- упругий элемент осесимметричный;
- внутренняя поверхность матрицы повторяет форму наружной поверхности детали;
- наружная поверхность упругого элемента имеет форму внутренней поверхности детали.

Прогиб упругого элемента зависит от изменения разнотолщинности на фланце заготовки и внутренних упругих сил. Под их действием он должен воздействовать на заготовку, уменьшая гофрообразование и утолщение, а после снятия нагрузки — принять начальную форму. Схема нагружения упругого элемента представлена на рис. 3.

В процессе вытяжки под действием усилия P_B упругий элемент прогибается, опираясь при этом на центральную часть заготовки. На него действуют поперечная сила P_B (усилие пуансона) и сила от опоры P , вследствие чего его радиус R_1 увеличивается до R_2 . Таким образом упругий элемент оказывает давление на заготовку и прижимает ее

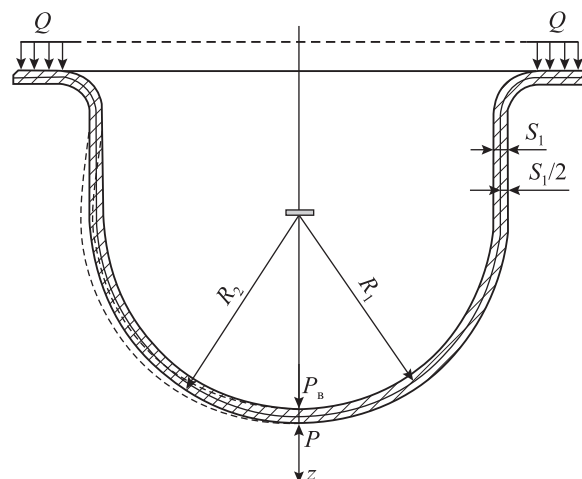


Рис. 3. Схема нагружения упругого элемента
Пояснения в тексте

к поверхности матрицы. При этом сам он находится под действием внутренних нормальных сил в окружном (T_θ) и меридиональном (T_p) направлениях и сдвиговой силы (N). Эти силы (в Н/м) принято относить к единице длины дуги [21]:

$$\begin{cases} T_\theta = \sigma_\theta S_1, \\ T_p = \sigma_p S_1, \\ N = \tau_k S_1, \end{cases} \quad (7)$$

где S_1 — толщина упругого элемента, мм; σ_θ и σ_p — напряжения внутри упругого элемента в окружном и меридиональном направлениях соответственно, МПа.

Для полусферы внутренние силы, действующие в окружном и меридиональном направлениях, равны

$$T_\theta = T_p = \rho R_1 / 2, \quad (8)$$

где $\rho = P_b / F_{cф}$ — внутреннее давление со стороны пуансона, МПа; $F_{cф} = 2\pi R_1^2$ — площадь внутренней поверхности упругого элемента, мм²; R_1 — внутренний радиус упругого элемента, мм.

Чтобы упругий элемент пластически не деформировался, необходимо, чтобы напряжения, возникающие внутри него, не превосходили предела текучести материала σ_s , т.е. должно выполняться условие

$$\sigma_p = \sigma_\theta < \sigma_s, \quad (9)$$

где

$$\sigma_p = \sigma_\theta = \frac{\rho R_1}{2S_1}. \quad (10)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что толщина упругого элемента составит

$$S_1 = \frac{P_b R_1}{2F_{cф} \sigma_T}, \quad (11)$$

где σ_T — предел текучести, МПа.

Зазор между пуансоном и упругим элементом должен быть равен значению максимальной разнотолщинности детали на фланце:

$$Z_1 = S_k - S_0. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Для проведения расчетов использовались следующие исходные данные:

- материал заготовки АМг6 ($\sigma_b = 340$ МПа, $\sigma_s = 170$ МПа);

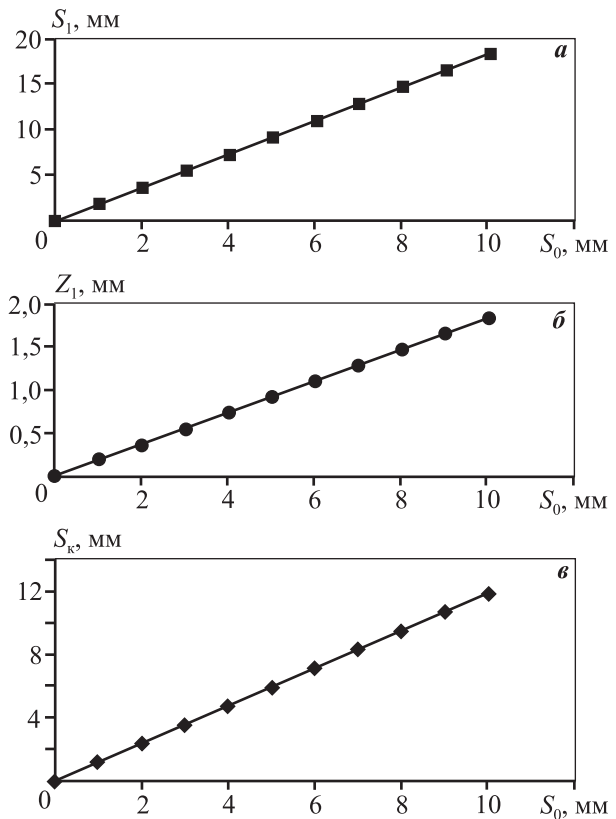


Рис. 4. Зависимости толщины упругого элемента (а), зазора между ним и пуансоном (б) и максимальной толщины кромки детали (в) от начальной толщины заготовки

- ее диаметр $D_0 = 150$ мм;
- материал упругого элемента 60ГС ($\sigma_b = 700$ МПа, $\sigma_s = 510$ МПа);
- коэффициенты вытяжки $k = 1,4$ и $k_1 = 1,8$;
- коэффициент трения $f_{тр} = 0,12$.

На рис. 4 представлены результаты расчета толщины упругого элемента, зазора между ним и пуансоном и максимальной толщины кромки детали, определенных по уравнениям (11), (12) и (3) соответственно, в зависимости от начальной толщины заготовки.

Расчеты по формулам (7)—(10) показали, что максимальное напряжение в упругом элементе в процессе штамповки равно $\sigma_p = 225$ МПа, что не превышает предела текучести материала 60ГС.

Заключение

Установлены технологические параметры процесса штамповки с применением упругого элемента из стали 60ГС для деталей типа полусферы ($D_0 = 150$ мм) из алюминиевого сплава АМг6 с коэф-

фициентом вытяжки $k = 1,4$ и различными толщинами заготовки (0,5—10 мм).

Расчеты показали, что минимальная толщина упругого элемента зависит от толщины изделия и составляет $S_1 = 1,83S_0$, но для удобства его изготовления этот размер можно упростить и принять постоянным: $S_1 = 2S_0$. Упругий элемент располагается на пуансоне, описывая его контур, и между ними имеется зазор $Z_1 = S_k - S_0$, величина которого зависит от максимальной разностолщинности детали, которая возникает на кромке фланца.

Эффект калибровки в конечной стадии процесса вытяжки позволяет добиться повышения точности изготавливаемых деталей. Также от воздействия упругого элемента на заготовку за счет возникновения дополнительных растягивающих напряжений уменьшается эффект гофрообразования.

В процессе штамповки упругий элемент пластически не деформируется, так как максимальные напряжения, возникающие внутри него ($\sigma_p = 225$ МПа), для толщин заготовки от 0,5 до 10 мм и соответствующих им толщин упругого элемента не превосходят предела текучести материала 60ГС ($\sigma_s = 510$ МПа), из которого он изготовлен [22]. После снятия нагрузки остаточные напряжения внутри объема упругого элемента равны нулю.

Таким образом, упругий элемент за счет увеличения трения блокирует опасное сечение, компенсирует упругое пружинение и позволяет получать детали с точными геометрическими размерами [23].

Литература

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979.
2. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977.
3. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. Mechanics of sheet metal forming. 2-nd Ed. Chennai, India: Butterworth-Heinemann (Printed and bound in Great Britain, Planta Tree). 2002.
4. Pearson C.E., Parkins R.N. The extrusion of metals. London: Chapman & Hall, 1961.
5. Dem'yanenko E.G. A Technique of shaping the barrel-type parts // Russ. Aeronaut. 2014. Vol. 57. No. 2. P. 204—211.
6. Демьяненко Е.Г. Формообразование тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой и вогнутой формы на основе процесса отбортовки // Заготовит. пр-ва в машиностр. 2014. No. 7. С. 23—28.
7. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В. Влияние параметров текстуры на устойчивость процессов формообразования анизотропных заготовок // Изв. СНЦ РАН. 2012. Т. 14. No. 4. С. 293—298.
8. Chen Jun, Shi Xiao-xiang, Ruan Xue-yu. Numerical simulation-driven optimization of sheet metal drawing part shape // Trans Nonferr. Met. Soc. China. 2003. Vol. 13. No. 4. P. 845—848.
9. En-zhi Gao, Hong-wei Li, Hong-chao Kou, Hui Chang, Jin-shan Li, Lian Zhou. Influences of material parameters on deep drawing of thin-walled hemispheric surface part // Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2009. Vol. 19. P. 433—437.
10. Jie Wu, Zengsheng Ma, Yichun Zhou, Chunsheng Lu. Prediction of failure modes during deep drawing of metal sheets with nickel coating // J. Mater. Sci. Technol. 2013. Vol. 29. No. 11. P. 1059—1066.
11. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1967.
12. Бирюков Н.М. Формообразование деталей из листового материала гидроэластичной средой по жесткому пуансону: Пат. 2212970 (РФ). 2003.
13. Томилов М.Ф., Шагунов А.В. Способ вытяжки эластичной средой: Пат. 2162759 (РФ). 2001.
14. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1974.
15. Sanders W.T. Deep Drawing method and apparatus: Pat. 3494169 (USA). 1970.
16. Bor-Tsuen Lin, Kun-Min Huang, Chun-Chih Kuo, Wen-Ting Wang. Improvement of deep drawability by using punch surfaces with microridges // J. Mater. Process. Technol. 2015. Vol. 225. P. 275—285.
17. Walde T., Riedel H. Simulation of earing during deep drawing of magnesium alloy AZ31 // Acta Mater. 2007. Vol. 55. P. 867—874.
18. Мошин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1973.
19. Попов И.П., Зимарёв М.В., Нестеренко Е.С. Усовершенствование процессов штамповки тонкостенных конических деталей // Заготовит. про-ва в машиностр. 2012. No. 7. С. 18—21.
20. Нестеренко Е.С., Попов И.П., Кузин А.О. Моделирование операции двухугольной гибки в штампе с упругим элементом // Изв. СНЦ РАН. 2016. Т. 18. No. 4. С. 25—30.
21. Бояришинов С.В. Основы строительной механики машин: Учеб. пос. для вузов. М.: Машиностроение, 1987.
22. Davis J.R. Heat-resistant materials. ASM International, 1997.
23. Nesterenko. E. Stamping of hemispheric surface parts in die tool equipped with steel elastic element // Key Eng. Mater. 2016. Vol. 684. P. 234—241.

References

1. *Romanovskij V.P.* Spravichnic po holodnoy shtampovke [Cold stamping handbook]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979.
2. *Storogev M.V.* Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of pressure metal treatment]. Moscow: Mashinostroenie, 1977.
3. *Marciniak, Z. Duncan, J.L. Hu, S.J.* Mechanics of sheet metal forming. 2-nd Ed. Chennai, India: Butterworth-Heinemann (Printed and bound in Great Britain, Planta Tree), 2002.
4. *Pearson C.E., Parkins R.N.* The extrusion of metals. London: Chapman & Hall, 1961.
5. *Dem'yanenko E.G.* A Technique of shaping the barrel-type parts. *Russ. Aeronaut.* 2014. Vol. 57. No. 2. P. 204—211.
6. *Dem'yanenko E.G.* Formoobrazovanie tonkostennix osetsimmetrichnix detaley vipukloy i vognutoy formi na osnovе processa otbortovki [Forming of thin-walled axisymmetric parts with buckled and concave shape based on bead forming process]. *Zagotovitelnie proizvodstva v mashinostroenii.* 2014. No. 7. P. 23—28.
7. *Erisov Y.A., Grechnikov F.V.* Vliynie parametrof tekturny na ustoychivost processof formoobrazovaniy anizotropnix zagotovok [Influence of structure parameters on process stability of anisotropic blanks' forming]. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra RAN.* 2012. No. 4. P. 293—298.
8. *Chen Jun, Shi Xiao-xiang, Ruan Xue-yu.* Numerical simulation-driven optimization of sheet metal drawing part shape. *Trans Nonferr. Met. Soc. China.* 2003. Vol. 13. No. 4. P. 845—848.
9. *En-zhi Gao, Hong-wei Li, Hong-chao Kou, Hui Chang, Jinshan Li, Lian Zhou.* Influences of material parameters on deep drawing of thin-walled hemispheric surface part. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2009. Vol. 19. P. 433—477.
10. *Jie Wu, Zengsheng Ma, Yichun Zhou, Chunsheng Lu.* Prediction of failure modes during deep drawing of metal sheets with nickel coating. *J. Mater. Sci. Technol.* 2013. Vol. 29. No. 11. P. 1059—1066.
11. *Isachenkov E.I.* Shtampovka rezinoy i gidkostu [Rubber and liquid forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1967.
12. *Birukov N.M.* Formoobrazovanie detaley iz listovogo materiala gidroelastichnoy sredoy po gostkomu puansonu [Sheet metal forming by hydro-elastic fluid long solid punch]: Pat. 2212970 (RF). 2003.
13. *Tomilov M.F., Shagunov A.V.* Sposob vitygki elastichnoy sredoy [Forming method by elastic fluid]: Pat. 2162759 (RF). 2001.
14. *Golovlev V.D.* Rascheti processov listovoy shtampovki [Designing of sheet metal forming processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1974.
15. *Sannders W.T.* Deep Drawing method and apparatus: Pat. 3494169 (USA). 1970.
16. *Bor-Tsuen Lin, Kun-Min Huang, Chun-Chih Kuo, Wen-Ting Wang.* Improvement of deep drawability by using punch surfaces with microridges. *J. Mater. Process. Technol.* 2015. Vol. 225. P. 275—285.
17. *Walde T., Riedel H.* Simulation of earing during deep drawing of magnesium alloy AZ31. *Acta Mater.* 2007. Vol. 55. P. 867—874.
18. *Moshnin E.N.* Tehnologiy shtampovki krupno gabaritnih detaley [Forming technique large machine part]. Moscow: Mashinostroenie, 1973.
19. *Popov I.P., Zimarev M.V., Nesterenko E.S.* Uovershenstvovanie processov shtampovki tonkostennih konicheskikh detaley [Improvement of thin wall cone shape parts' forming]. *Zagotovitelnie proizvodstva v mashinostroenii.* 2012. No. 7. P. 18—21.
20. *Nesterenko E.S., Popov I.P., Kuzin A.O.* Modelirovanie operatsii dvuhuglovoi gibki v shtampe s uprugim prigrimom [Modeling of operation two-angular are flexible in a stamp with an elastic element]. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra RAN.* 2016. Vol. 18. No. 4. P. 25—30.
21. *Boyarshev S.V.* Osnovi stroitelnoy mahaniki mashin [Bases of machinery structural analyses]. Moscow: Mashinostroenie, 1987.
22. *Davis J.R.* Heat-resistant materials. ASM International, 1997.
23. *Nesterenko E.* Stamping of hemispheric surface parts in die tool equipped with steel elastic element. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 684. P. 234—241.