

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

В.А. Сторожилов

storozhilov_rzn@mail.ru

SPIN-код: 3132-7913

Д.А. Фонарев

denisfon@rambler.ru

SPIN-код: 5349-8329

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Методом конечных элементов в программном комплексе *Deform* исследован процесс вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок, толщина которых уменьшается в направлении от центральной области к кромке по линейному закону. Получены графические зависимости силы вытяжки от смещения фланца заготовки и толщины ее кромки. Установлен характер распределения толщины вытянутой детали в цилиндрической части детали, ее плоском дне, а также в области перехода цилиндрической части в донную. Показан характер изменения высоты детали в зависимости от исходной толщины кромки дисковой заготовки.

Ключевые слова

Вытяжка, заготовка переменной толщины, численное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, толщина кромки дисковой заготовки, сила вытяжки, разнотолщинность стенки, относительная высота цилиндрической части, верификация

Поступила в редакцию 12.10.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Применение дисковых листовых заготовок переменной толщины для вытяжки цилиндрических деталей является перспективным направлением снижения материальных и временных затрат в многономенклатурном мелкосерийном производстве оболочечных деталей летательных аппаратов и изделий специальной техники. Заготовки с переменной толщиной позволяют вытягивать детали с регулируемым распределением толщины стенки и обеспечивают большее значение коэффициента вытяжки k_0 (равного отношению диаметра исходной дисковой заготовки к диаметру вытяжного пуансона) по сравнению с заготовками постоянной толщины. Это способствует улучшению технико-экономических показателей производства благодаря сокращению числа промежуточных операций вытяжки, а также количества комплектов штамповой оснастки [1–8].

Помимо аналитических и экспериментальных методов исследования процесса вытяжки деталей из листовых заготовок переменной толщины, изложенных в работах [2–6], представляется целесообразным применение численных расчетных методов. С их помощью можно полностью смоделировать процесс вытяжки, учитывая реальные физические и технологические условия взаимодействия заготовки с элементами штамповой оснастки, в полном объеме проанализировать напряженно-деформированное

состояние в любой момент времени для любой области заготовки, проследить за изменением силы штамповки, определить точную геометрию полученной детали и оценить степень ее отклонения от требований конструкторской документации [1].

Широкий набор возможностей для моделирования процессов штамповки предоставляет программный комплекс Deform, работа которого основана на методе конечных элементов. Возможности данного комплекса позволяют задавать в качестве исходных данных геометрические параметры и материал заготовки, модель его деформирования, геометрические параметры штамповой оснастки, характеристики трения между соприкасающимися поверхностями, настраивать сетку конечных элементов, задавать закон движения инструмента и ряд дополнительных условий, в которых протекает вытяжка.

В данной статье с помощью программного комплекса Deform исследован процесс вытяжки детали цилиндрической формы с плоским дном из дисковой листовой заготовки переменной толщины. Цель исследований — установить влияние толщины кромки заготовки на геометрические параметры вытягиваемой детали и требуемую силу штамповки.

Особенности моделирования вытяжки. Вытягиваемая деталь имела три области: плоскую донную I, переходную II и цилиндрическую III (рис. 1, а). Заготовка дисковой формы включала две области: центральную область постоянной толщины, соответствующую донной части вытягиваемой детали, и область переменной толщины, из которой формировались цилиндрическая и переходная части детали (рис. 1, б).

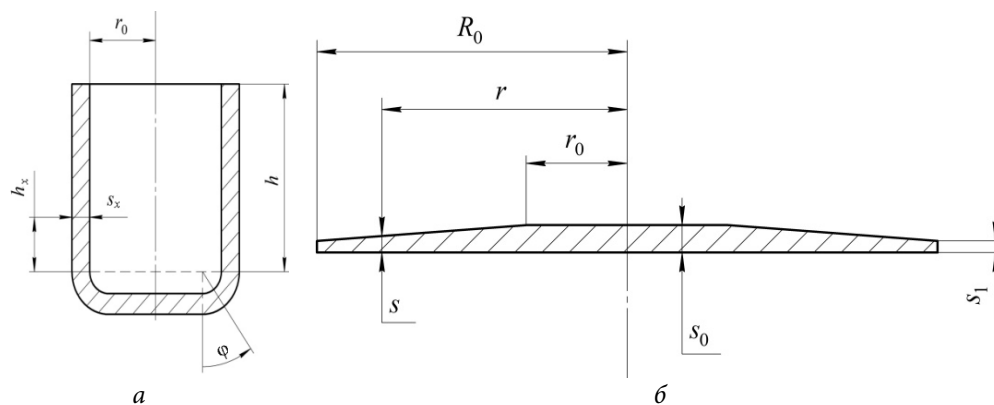


Рис. 1. Схемы вытягиваемой детали (а) и применяемой дисковой заготовки (б)

Основными геометрическими параметрами, характеризующими дисковую заготовку переменной толщины, являлись ее исходный радиус R_0 , радиус r_0 области постоянной толщины s_0 , равный радиусу R вытягиваемой детали, и толщина s_1 кромки. В безразмерном виде зависимость толщины \bar{s} заготовки от ее радиуса \bar{r} в области $1 < \bar{r} < \bar{R}_0$ описывается линейным законом

$$\bar{s}(\bar{r}) = 1 - \frac{(\bar{r} - 1)}{(\bar{R}_0 - 1)}(1 - \bar{s}_1),$$

где $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$, $\bar{s} = \frac{s}{s_0}$, $\bar{s}_1 = \frac{s_1}{s_0}$, $\bar{R}_0 = K_0 = \frac{R_0}{r_0}$.

При числовых расчетах дисковая заготовка имела следующие размеры: $s_0 = 0,95$ мм, $r_0 = 25$ мм, $R_0 = 48$ мм, $k_0 = 1,92$ мм. Относительная толщина кромки \bar{s}_1 заготовки изменялась в диапазоне 1,00...0,26.

Для моделирования вытяжки детали использовали штамп, отличающийся от типовых штампов, представленных в справочной литературе (например, [9]), тем, что торец его прижима выполняли коническим для обеспечения равномерного прижатия фланца детали к лицевой поверхности матрицы в течение всего процесса вытяжки (рис. 2).

Принимали, что трение между поверхностями заготовки и штампа подчиняется закону Кулона. Коэффициент трения между заготовкой, матрицей и прижимом назначали равным 0,09, а между заготовкой и пуансоном — 0,26 [9].

Все значения заданы в соответствии с рекомендациями работ [9, 10] для обеспечения возможности последующей верификации.

Для каждого случая был смоделирован процесс вытяжки и получены данные о напряженно-деформированном состоянии в течении процесса, распределении толщины детали, высоте цилиндрических областей и усилия главного инструмента.

Верификация. Для того чтобы обосновать возможность применения данной методики при исследовании процесса вытяжки, необходимо провести верификацию созданной модели. В настоящей работе было проведено сравнение данных, полученных в результате численного моделирования вытяжки детали из заготовки постоянной толщины, с известными экспериментальными данными по распределению толщин в донной, цилиндрической и переходной части [9, 10]. Сравнение проиллюстрировано с помощью графиков, представленных на рис. 3–5. В качестве координат выбраны: относительная толщина стенки $\bar{s}_x = s_x/s_0$ — по оси ординат; текущая относительная высота стакана $\bar{h}_x = h_x/h_0$, угловая координата φ и относительный радиус в рассматриваемом сечении донной части детали $\bar{R}_x = R_x/R_0$ — по оси абсцисс.

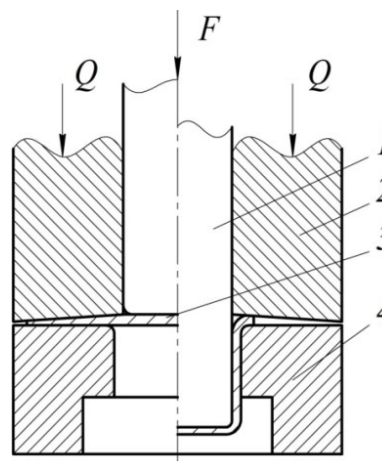


Рис. 2. Схема штампа:

1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — заготовка переменной толщины; 4 — матрица; F , Q — силы вытяжки и прижима

Верификация показывает, что отличие результатов проведенного расчета от результатов известного эксперимента не превышает 10 %. Это позволяет говорить о том, что подобной методикой можно пользоваться для анализа деформирования деталей из заготовок различной геометрии.

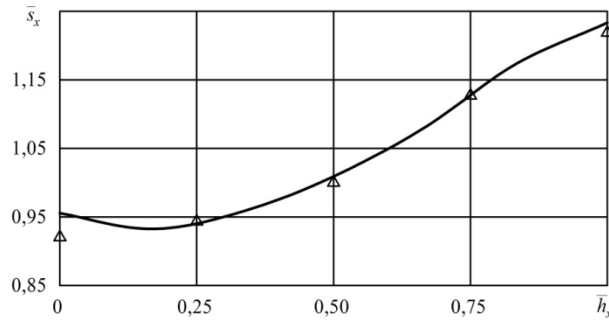


Рис. 3. Сравнение распределения толщин в цилиндрической части, полученных путем численных расчетов, с экспериментальными данными (сплошной линией обозначены результаты, полученные путем численных расчетов в программном комплексе Deform, символом Δ — экспериментальные данные)

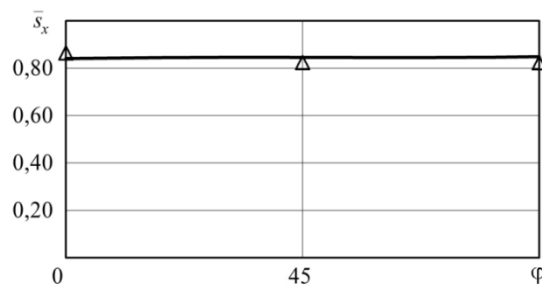


Рис. 4. Сравнение распределения толщин в области перегиба, полученных путем численных расчетов, с экспериментальными данными (сплошной линией обозначены результаты, полученные путем численных расчетов в программном комплексе Deform, символом Δ — экспериментальные данные)

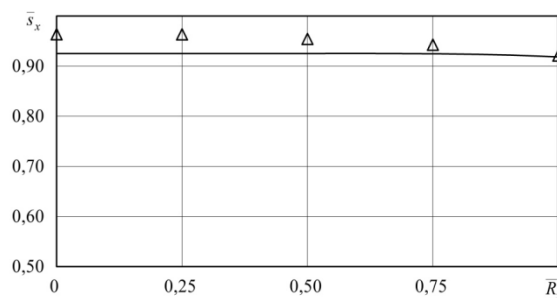


Рис. 5. Сравнение распределения толщин в донной части, полученных путем численных расчетов, с экспериментальными данными (сплошной линией обозначены результаты, полученные путем численных расчетов в программном комплексе Deform, символом Δ — экспериментальные данные)

Результаты моделирования процесса вытяжки деталей из заготовок переменной толщины. Положительные результаты верификации позволили перейти к численному анализу вытяжки деталей из заготовок переменной толщины. Все полученные данные в результате процесса моделирования по каждому шагу доступны к просмотру в «постпроцессоре». Здесь можно вывести на экран множество параметров в той или иной форме представления, наиболее удобной для пользователя.

Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе вытяжки можно отследить в «постпроцессоре» в виде нескольких форм представления: поэлементно разным цветом в зависимости от значения параметра, цветовым градиентом в зависимости от значения параметра, векторным полем, двумерными линиями. Наиболее наглядная форма представления в целях демонстрации — цветовое распределение. При выборе этой формы отображения наиболее напряженные участки окрашиваются в более теплые тона, менее напряженные — в более холодные (рис. 6).

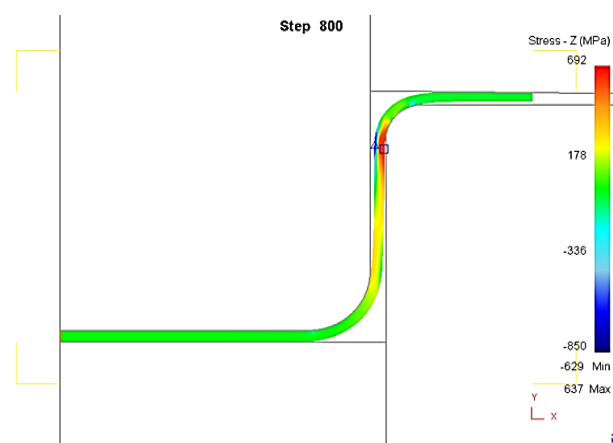


Рис. 6. Распределение напряжений по заготовке в соответствии с цветовой шкалой

В результате моделирования процесса вытяжки цилиндрических деталей из заготовок с различной толщиной кромки была получена картина изменения напряженно-деформированного состояния заготовки. Выявлено, что максимальные радиальные напряжения во фланце концентрируются в области перетяжного ребра, что не противоречит результатам расчетов с помощью аналитических методов.

«Постпроцессор» также позволяет следить за изменением усилия главного инструмента. В данной работе для четырех смоделированных процессов с заготовками разной толщиной кромки было получено четыре кривых изменения усилия в зависимости от текущего значения коэффициента вытяжки $k_T = R_T/R_0$, который изменяется от k_0 до 1 (рис. 7). Ось абсцисс на данном графике начинается не со значения $k_0 = 1,96$, что соответствует исходному коэффициенту вытяжки всех заготовок, а с $k_T = 1,6$. Выбор такого диапазона значе-

ний связан со сложностью анализа в промежутке $k_T = 1,96 \dots 1,60$ ввиду отсутствия установившегося цилиндрического участка. На рис. 7 видно, что сила вытяжки по мере сокращения диаметра фланца в процессе вытяжки уменьшается, что объясняется сокращением диаметра фланца заготовки, несмотря на упрочнение материала фланца в результате пластической деформации.

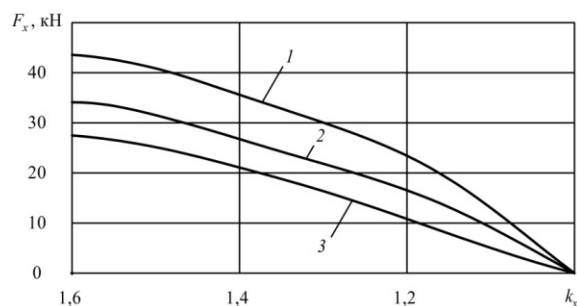


Рис. 7. Изменение силы штамповки при различных относительных толщинах кромки:

1 — $\bar{s}_1 = 1,0$; 2 — $\bar{s}_1 = 0,75$; 3 — $\bar{s}_1 = 0,52$; 4 — $\bar{s}_1 = 0,26$

С помощью инструментов просмотра объектов смоделированного процесса можно определить геометрические характеристики готовой детали. Для четырех смоделированных процессов получены данные о распределении толщины стенки детали в различных областях (рис. 8, 9) и относительной высоте цилиндрической части деталей (рис. 10). На рисунках видно, что детали, полученные из заготовок с различной толщиной кромки, обладают разной степенью разнотолщинности и относительной высотой цилиндрической части соответственно.

Как видно на рис. 8, деталь с наиболее равномерной стенкой в цилиндрической области получается при использовании заготовки с относительной толщиной кромки $\bar{s}_1 = 0,75$, что близко к результатам вычислений по соответствующим аналитическим соотношениям между толщиной края стенки и толщиной кромки, полученным на основании экспериментальных данных [9, 10].

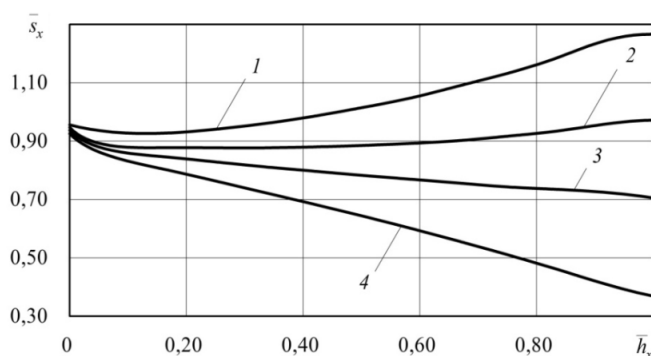


Рис. 8. Распределение относительной толщины стенки \bar{s}_x в области цилиндрического стакана по относительной высоте \bar{h}_x для нескольких заготовок с разными толщинами кромок:

1 — $\bar{s}_1 = 1,0$; 2 — $\bar{s}_1 = 0,75$; 3 — $\bar{s}_1 = 0,52$; 4 — $\bar{s}_1 = 0,26$

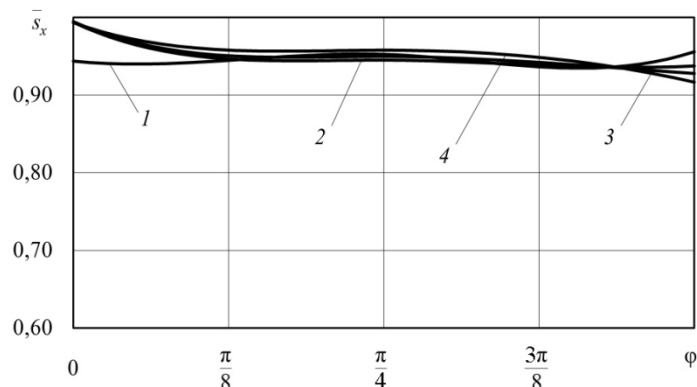


Рис. 9. Распределение относительной толщины стенки \bar{s}_x в области перегиба по углу поворота φ для нескольких заготовок с разными толщинами кромок:

1 — $\bar{s}_1 = 1,0$; 2 — $\bar{s}_1 = 0,75$; 3 — $\bar{s}_1 = 0,52$; 4 — $\bar{s}_1 = 0,26$

Также были получены данные о разнотолщинности деталей в донной области. Сравнивая значения, можно прийти к выводу, что порядок величины толщины стенки в донной части на четыре разряда выше, чем порядок максимальной разнотолщинности во всех четырех случаях. Следовательно, толщина кромки заготовки не влияет существенным образом на разнотолщинность донной части детали.

Выводы. При исследовании процесса вытяжки цилиндрических деталей из заготовок переменной толщины с помощью численного метода установлено, что высота детали изменяется в зависимости от толщины кромки заготовки. Чем меньше толщина кромки, тем высота становится меньше. С уменьшением относительной толщины кромки до 50 % ее изначальной толщины высота изменяется почти на 13 %. Получены данные о напряженно-деформированном состоянии заготовки, о распределении толщины детали в ее различных областях, об относительной высоте ее цилиндрической части, о значении силы главного инструмента. Установлено, что толщина стенки цилиндрической части детали уменьшается по мере приближения к донной части в результате воздействия растягивающей силы. Также установлено, что чем меньше толщина на кромке фланца, тем сильнее утонение в донной части. Такой набор выходных данных за одну операцию моделирования позволяет назвать численный метод «многофункциональным». Данным методом можно отслеживать значение тех или иных величин в конкретных точках заготовки и, задействуя одновременно возможности ЭВМ, получать сведения о нескольких изменяющихся параметрах сразу, что является несомненным преимуществом в сравнении с аналитическими методами [5, 6].

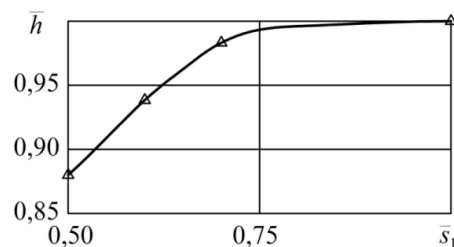


Рис. 10. Зависимость относительной высоты \bar{h} цилиндрической части детали от относительной толщины кромки \bar{s}_1 исходной заготовки

Литература

- [1] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2014, № 7, с. 21–24.
- [2] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Вытяжка металлофторопластовых втулок из дисковых заготовок переменной толщины. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 7, с. 16–22.
- [3] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Фёдоров С.В. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [4] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А., Зарубина О.В. Оценка предельной степени вытяжки цилиндрических деталей из переменных по толщине дисковых заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 1, с. 3–6.
- [5] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Математическая модель расчета предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 4(697), с. 10–18.
- [6] Левина А.В., Сторожилов В.А., Фонарев Д.А. Графоаналитический метод определения предельного коэффициента вытяжки деталей из заготовок переменной толщины. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 4.
URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/form/288.html>.
- [7] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Особенности проектирования и изготовления листовых заготовок переменной толщины для вытяжки деталей ЛА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, № 6(78).
URL: <http://engjournal.ru/catalog/arсе/dсра/1774.html>.
- [8] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Никольская Я.М. *Способ штамповки-вытяжки оболочечных листовых деталей пластичным металлом*. Патент РФ 2623510. Заявл. 04.04.2016.
- [9] Шофман Л.А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1964, 375 с.
- [10] [Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979, 520 с.

Сторожилов Владимир Александрович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Фонарев Денис Антонович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Баскаков Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Бабурин Михаил Аронович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE PROCESS-DRAWING OF CYLINDRICAL PARTS OF PARENT SHEET WORK MATERIALS OF TAPERED THICKNESS

V.A. Storozhilov

storozhilov_rzn@mail.ru

SPIN-code: 3132-7913

D.A. Fonarev

denisfon@rambler.ru

SPIN-code: 5349-8329

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper dwells upon the process of drawing cylindrical parts from sheet blanks, the thickness of which decreases in the direction from the central region to the edge according to the linear law, that studied by the finite element method in the Deform software complex. The author obtained the graphic dependences of the drawing force on the displacement of the work material flange and the thickness of its edge. In his paper the author showed the characteristics of the distribution of the thickness of the elongated part in the cylindrical part of the part, its flat bottom, as well as in the transition of the cylindrical part to the bottom. The author showed the characteristics of the change in the height of the part depending on the initial thickness of the edge of the disk work material.

Keywords

Air funnel, a work material of tapered thickness, numerical simulation, finite element method, stress-strain state, the thickness of the edge of the disk preform, the pulling force, variable thickness, the relative height of the cylindrical part verification

Received 12.10.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Analysis of workpieces form changing at the drawing of hemispherical parts with the application of intermediate deformed media. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2014, no. 7, pp. 21–24.
- [2] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Drawing of metalfluoraplastic sleeves from disk workpieces of variable thickness. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2015, no. 7, pp. 16–22.
- [3] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Ya.M., Fedorov S.V. Application of thickness-shaped billets to control wall thickness of shell parts die-stamped by lead. *Tekhnologiya metallov*, 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [4] Baburin M.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A., Zarubina O.V. The evaluation of the maximum degree hood of cylindrical parts from the disk blanks with variable thickness. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2015, no. 1, pp. 3–6.
- [5] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. A mathematical model for calculating the limiting drawing ratio of cylindrical parts drawn from

- sheet blanks of variable thickness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2018, no. 4(697), pp. 10–18.
- [6] Levina A.V., Storozhilov V.A., Fonarev D.A. Graphoanalytical method of defining the limiting ratio of drawing the workpieces from the tapered thickness blanks. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 4. Available at: <http://ptsj.ru/catalog/menms/form/288.html>.
- [7] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Design and production specifics of variable-thickness sheet metal workpieces for aircraft part drawing. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 6(78). URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/dcpa/1774.html>.
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Fedorov S.V., Nikol'skaya Ya.M. Sposob shtampovki-vytyazhki obolochechnykh listovykh detaley plastichnym metallom [Method of shell parts drawing of plastic metal]. Patent 2623510 RF. Appl. 04.04.2016.
- [9] Shofman L.A. Teoriya i raschety protsessov kholodnoy shtampovki [Theory and calculation of cold forming processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964, 375 p.
- [10] [10] Romanovskiy V.P. Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Handbook on cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979, 520 p.

Starozhilov V.A. — Bachelor's Degree student, Department of Aerospace engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Fonarev D.A. — Bachelor's Degree student, Department of Aerospace engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific adviser — V.D. Baskakov, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Department of Aerospace engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific adviser — M.A. Baburin, PhD of Engineering, Assist. Professor, Department Department of Aerospace engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.