УДК 621.7.043; 621.983.3.01/09 DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-10-18

Математическая модель расчета предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины

М.А. Бабурин, В.Д. Баскаков, Н.В. Герасимов, О.В. Зарубина, В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

A Mathematical Model for Calculating the Limiting Drawing Ratio of Cylindrical Parts Drawn from Sheet Blanks of Variable Thickness

M.A. Baburin, V.D. Baskakov, N.V. Gerasimov, O.V. Zarubina, V.A. Tarasov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: babma@mail.ru, baskakov_vd@mail.ru, gerasimovnv@gmail.com, ov_zarubina@mail.ru, tarasov_va@mail.ru

Приведено решение актуальной задачи определения предельных деформационных возможностей листового металла при формообразовании цилиндрических деталей, на основе которого созданы научно-методические рекомендации для управления качеством и технико-экономическими показателями выпускаемой продукции. Путем решения дифференциального уравнения равновесия фланца заготовки переменной толщины, описываемой степенным законом, получены аналитические и графические зависимости для оценки предельного коэффициента вытяжки деталей без учета и с учетом смещения фланца. Выявлены закономерности влияния толщины края заготовки и показателя степени закона изменения ее толщины на коэффициент вытяжки. Показано, что наибольшее значение предельного коэффициента вытяжки обеспечивает параболический закон изменения толщины. По результатам расчетов установлено, что для вытяжки деталей с постоянной толщиной стенки наибольшего значения предельного коэффициента вытяжки можно достичь, используя дисковые заготовки с толщиной, изменяющейся по линейному закону в радиальном направлении. Проанализированы рациональные технологии изготовления заготовок переменной толщины и особенности последующей вытяжки цилиндрических деталей.

Ключевые слова: листовая заготовка, коэффициент вытяжки, предельный коэффициент вытяжки, заготовка переменной толщины, вогнутая образующая, смещение фланца

This paper presents a solution to a topical problem of determining the limit deformation capability of sheet metal when forming cylindrical parts. This solution is further used to develop methodological recommendations to control the quality as well as technical and economic indicators of the manufactured products. By solving a differential equilibrium equation for a workpiece flange of variable thickness described by the power rule, analytical and graphic dependencies are obtained for evaluating the limiting drawing ratio with and without taking into account flange displacement. The influence patterns of the workpiece

edge thickness and the power of the thickness variation law on the drawing ratio are revealed. It is shown that the largest value of the limiting drawing ratio is provided by the parabolic law of thickness variation. Based on the calculation results, it is established that for drawing parts with a constant wall thickness, the largest limiting drawing ratio can be obtained using disk workpieces with a thickness that changes following the linear law in the radial direction. Efficient technologies for manufacturing workpieces of variable thickness and features of subsequent drawing of cylindrical parts are analysed.

Keywords: sheet workpiece, drawing ratio, limiting drawing ratio, variable thickness workpiece, concave generator, flange displacement

Одной из самых сложных задач листовой штамповки является обеспечение постоянства толщины стенки изготавливаемых деталей. Опыт производства, проектирования и применения формообразующих технологий показывает, что при выполнении большинства штамповочных операций у листовых деталей формируется разнотолщинность [1–15]. На практике ее можно уменьшить разными путями, например механической или электрохимической обработкой деталей после деформирования. Частичное снижение разнотолщинности листовых деталей достигается использованием рациональных режимов и условий проведения штамповочных операций [2, 4].

К наиболее перспективным направлениям существенного уменьшения разнотолщинности деталей с осевой симметрией относится предварительное профилирование листовых заготовок по толщине, так как во многих случаях это технически и экономически целесообразнее, чем удаление слоя металла после штамповки [9–15]. Такие заготовки позволяют изготавливать вытяжкой разнообразные оболочечные осесимметричные детали с заданным распределением толщины стенки вдоль образующей и обеспечивают сокращение количества вытяжных операций. При этом можно получать детали не только с постоянной толщиной стенки, но и с уменьшающейся в направлении от купола к открытому краю [11, 13, 14].

Уменьшение толщины стенки дисковой заготовки от центральной части к краю при сохранении ее толщины постоянной в области передачи усилия со стороны пуансона облегчает деформирование фланца штампуемой детали и способствует увеличению предельного коэффициента вытяжки — максимально возможного отношения диаметра заготовки к диаметру детали, вытягиваемой за одну технологическую операцию (рис. 1). В частности, по сравнению с заготовками постоянной толщины s_0 заготовки с толщиной, изменяющейся по линейному закону, позволяют повысить теоретическое значение предельного коэффициента вытяжки k_0 с 2,72 до 4,92 (при толщине края заготовки $s_1 = 0$, а также без учета трения заготовки о штамповую оснастку и изгиба ее фланца на перетяжном ребре матрицы) [11].

Несмотря на практическую значимость заготовок переменной толщины для вытяжки осесимметричных оболочечных деталей, остается нерешенной важная задача нахождения распределения толщины вдоль образующей заготовки, обеспечивающего наибольшее значение коэффициента вытяжки. Ее решение позволит не только целенаправленно управлять разнотолщинностью деталей, но и разрабатывать малооперационные технологии их изготовления.

Цель работы — научное обоснование рекомендаций по проектированию листовых заготовок переменной толщины, обеспечивающих сокращение числа вытяжных операций при изготовлении оболочечных деталей цилиндрической формы.

В качестве основных геометрических параметров, характеризующих заготовку переменной толщины, выберем радиус R_0, радиус r_0 области постоянной толщины заготовки (равный радиусу вытяжного пуансона) и толщину s_1 кромки заготовки. В области фланца

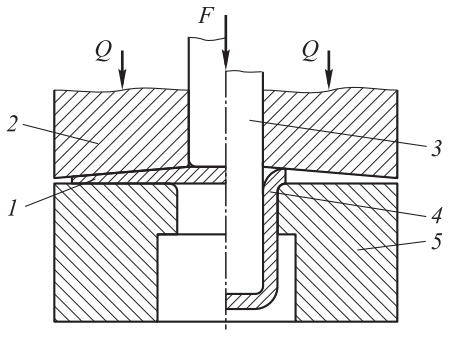


Рис. 1. Схема вытяжки цилиндрической детали из переменной по толщине дисковой заготовки: *1* — заготовка; *2* — прижим; *3* — пуансон; *4* — деталь; *5* — матрица; *F* и *Q* — силы штамповки и прижима фланца

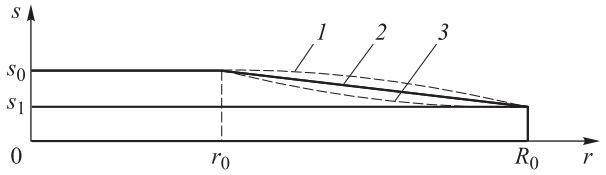


Рис. 2. Схема заготовки переменной толщины: *1*, *2* и *3* — соответственно выпуклая, прямолинейная и вогнутая образующие

радиус заготовки r и ее толщина s изменяются в диапазонах $r_0 \le r \le R_0$ и $s_1 \le s \le s_0$. Образующая фланца $s = s(r)$ может иметь три характерные формы: прямолинейную, вогнутую и выпуклую (рис. 2).

Рассмотрим уравнение равновесия фланца заготовки переменной толщины, используя в качестве модели материала идеальное жесткопластическое тело и применяя условие пластичности Сен–Венана–Треска [11]:

$$\frac{d\bar{\sigma}_1}{d\bar{r}} + \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{s}(\bar{r})}\frac{d\bar{s}(\bar{r})}{d\bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}} = 0, \qquad (1)$$

где $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/\sigma_0$ (σ_1 — меридиональные напряжения; σ_0 — прочностная характеристика жесткопластического тела); $\bar{r} = r/r_0$; $\bar{s} = s/s_0$.

Можно показать, что уравнение (1) имеет следующее решение:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{1}{\bar{s}(\bar{r})}\left(-\int \frac{\bar{s}(\bar{r})}{\bar{r}} d\bar{r} + C_0\right), \qquad (2)$$

где C_0 — постоянная интегрирования, определяемая из граничного условия $\bar{\sigma}_1 = 0$ при $\bar{r} = k = R_0/r_0$ (k — коэффициент вытяжки).

Чтобы представить выражение (2) в аналитическом виде, необходимо задать функцию изменения толщины фланца $\bar{s} = \bar{s}(\bar{r})$. В качестве такой функции можно использовать степенные зависимости, например

$$\bar{s}(\bar{r}) = (1 - \bar{s}_1)\left(\frac{k - \bar{r}}{k - 1}\right)^n + \bar{s}_1, \qquad (3)$$

где $\bar{s}_1 = s_1/s_0$; $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ — число, позволяющее описывать заготовки постоянной ($n = 0$) и переменной толщины с прямолинейной ($n = 1$) и вогнутой ($n = 2, 3, \ldots$) образующими.

Для заготовок с образующей выпуклой формы можно использовать зависимость

$$\bar{s}(\bar{r}) = 1 - (1 - \bar{s}_1)\left(\frac{\bar{r} - 1}{k - 1}\right)^n, \qquad (4)$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$ — любое натуральное число, применяемое для описания прямолинейной образующей ($n = 1$), образующей выпуклой формы ($n = 2, 3, \ldots$) и заготовки постоянной толщины ($n \to \infty$).

При $n = 2, 3, \ldots$ образующие (3), (4) проходят через точки с координатами $\bar{r} = 1$, $\bar{s} = 1$ и $\bar{r} = k$, $\bar{s} = \bar{s}_1$, различаясь не только знаком кривизны, но и местом расположения экстремума: соотношение (3) имеет минимум в точке $\bar{r} = k$, $\bar{s} = \bar{s}_1$, а выражение (4) — максимум в точке $\bar{r} = 1$, $\bar{s} = 1$. Такие особенности зависимостей (3), (4) позволяют использовать их для решения уравнения (2) с целью исследования влияния на предельный коэффициент вытяжки k_0 не только формы образующей дисковой заготовки, но и интенсивности ее утонения, определяемой значением показателя степени n.

Исследования проведем в несколько этапов. Вначале определим, какая форма образующей (прямолинейная, вогнутая, выпуклая) у дисковой заготовки переменной толщины в наибольшей степени способствует повышению предельного коэффициента вытяжки k_0. Для того чтобы ответить на этот вопрос, примем в зависимостях (3), (4) показатель степени $n = 2$. Тогда, подставляя соотношения (3), (4) в уравнение (2), проводя интегрирование и определяя значения постоянной C_0, можно показать, что меридиональные напряжения во фланце заготовки имеют вид

$$\bar{\sigma}_1 = \left[a\left(k^2 - \bar{r}^2\right)/2 + b\left(k - \bar{r}\right) + c\ln\left(k/\bar{r}\right)\right]/\bar{s}(\bar{r}). \qquad (5)$$

В выражении (5):

для вогнутой образующей (3)

$$a = (1 - \bar{s}_1)/M, \quad b = -2k(1 - \bar{s}_1)/M, \quad c = \left(k^2 - 2k\bar{s}_1 + \bar{s}_1\right)/M;$$

для выпуклой образующей (4)

$$a = -(1 - \bar{s}_1)/M, \quad b = 2(1 - \bar{s}_1)/M, \quad c = \left(k^2 - 2k + \bar{s}_1\right)/M,$$

где $M = (k-1)^2$.

Для оценки k_0 в выражении (5) следует положить, что при $\bar{r} = 1$ и $\bar{\sigma}_1 = 1$ коэффициент вытяжки $k = k_0$. Тогда, опуская промежуточные преобразования, из формулы (5) получим следующие зависимости, устанавливающие связь предельного коэффициента вытяжки k_0 с относительной толщиной $\bar{s}_1$ кромки заготовки переменной толщины:

для вогнутой образующей (3)

$$\overline{s_1} = \frac{2,5k_0^2 - 4k_0 + 1,5 - k_0^2 \ln k_0}{1,5k_0^2 - 2k_0 + 0,5 - (2k_0 - 1)\ln k_0}; \qquad (6)$$

для выпуклой образующей (4)

$$\overline{s_1} = \frac{1,5k_0^2 - 4k_0 + 2,5 - k_0(k_0 - 2)\ln k_0}{0,5k_0^2 - 2k_0 + 1,5 + \ln k_0}. \qquad (7)$$

Графики, построенные по формулам (6), (7) и данным работы [11], показывают, что с уменьшением толщины $\overline{s_1}$ кромки заготовки предельный коэффициент вытяжки k_0 монотонно возрастает, причем во всем диапазоне изменения $\overline{s_1}$ вогнутая образующая обеспечивает большее значение k_0, чем прямолинейная и выпуклая (рис. 3). При $\overline{s_1} = 0$ предельный коэффициент вытяжки достигает наибольших значений: k_0 = 7,18 для вогнутой образующей; k_0 = 3,90 для выпуклой образующей; k_0 = 4,92 для прямолинейной образующей.

С учетом более высокого значения предельного коэффициента вытяжки дальнейшему анализу подвергались только дисковые заготовки с вогнутой образующей. При этом исследовалось влияние интенсивности спада толщины в направлении от центра заготовки к краю, определяемой показателем степени $n = 2, 3, \ldots$ закона (3) изменения толщины, на предельный коэффициент вытяжки k_0. Подставляя соотношение (3) в уравнение (2), для любого $n = 2, 3, \ldots$ можно получить трансцендентные уравнения, позволяющие оценить меридиональные напряжения $\overline{\sigma}_1$ во фланце заготовки, которые в силу своей сложности в данной статье не приведены. Поступая по аналогии с выводом формул (6) и (7), для любого значения n можно получить взаимосвязь предельного коэффициента вытяжки k_0 и толщины $\overline{s_1}$ края дисковой заготовки (рис. 4, кривые *1*).

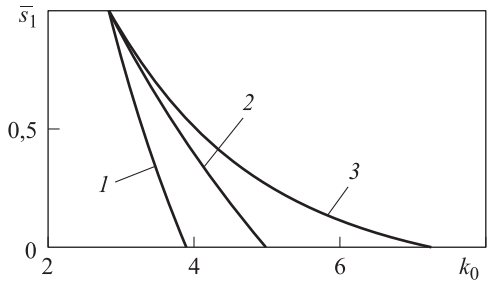


Рис. 3. Взаимосвязь предельного коэффициента вытяжки k_0 и толщины $\overline{s_1}$ кромки заготовки переменной толщины для прямолинейной (*1*), вогнутой (2) и выпуклой (*3*) образующих

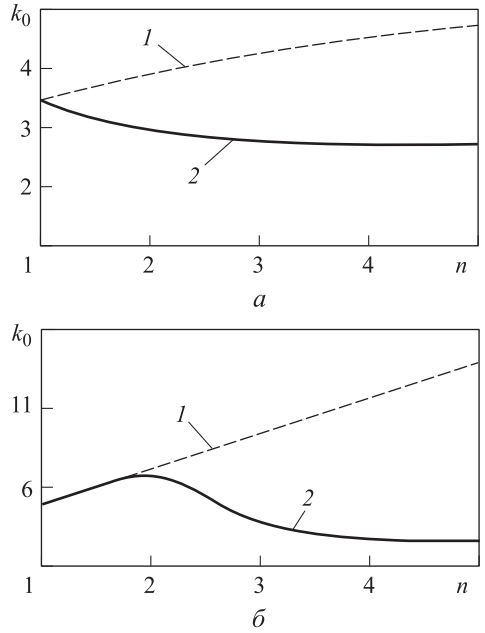


Рис. 4. Зависимости предельного коэффициента вытяжки k_0 от показателя степени n закона изменения толщины фланца без учета (*1*) и с учетом (*2*) его смещения при различных значениях толщины края дисковой заготовки: *а* — $\overline{s_1} = 0,5$; *б* — $\overline{s_1} = 0$

Анализ представленных на рис. 4 графических зависимостей (кривых *1*) позволяет сделать парадоксальный, на первый взгляд, вывод об отсутствии ограничений на повышение предельного коэффициента вытяжки k_0 с ростом показателя степени n в законе (3) распределения толщины дисковой заготовки $\overline{s}$ по радиусу $\overline{r}$. Однако следует отметить, что полученные результаты относятся к начальной стадии деформирования заготовки без учета перемещения ее фланца. Если учитывать его перемещение, то при больших значениях n на промежуточных стадиях вытяжки у заготовки перепад толщины между ее элементами, расположенными на перетяжном ребре матрицы, и краем фланца будет быстро уменьшаться, что может привести к возрастанию меридиональных напряжений $\overline{\sigma}_1$ и отрыву фланцевой части вытягиваемой детали.

Для оценки влияния перемещения фланца на меридиональные напряжения $\overline{\sigma}_1$ и предельный коэффициент вытяжки k_0 разработана модель, основанная на следующих допущениях:

1) перемещение края фланца не зависит от характера распределения в нем толщины и при заданном ходе пуансона соответствует перемещению края фланца дисковой заготовки постоянной толщины. Это допущение не противоре-

чит результатам экспериментов и, по существу, соответствует принятому в листовой штамповке положению о том, что площадь дисковой заготовки должна равняться площади поверхности вытянутого цилиндра;

2) перемещение фланца происходит в соответствии со схемой, представленной на рис. 5. Согласно ей, при уменьшении радиуса фланца заготовки с R_0 до R_0' элемент заготовки, имевший исходную радиальную координату r_0' и толщину s_0', достигает перетяжного ребра матрицы, расположенного на координате r_0. При этом толщина s_1 края заготовки не изменяется. Постоянным остается также показатель степени n закона (3) изменения толщины фланца: он одинаков для исходного и перемещающегося фланцев.

Второе из двух принятых допущений может быть реализовано на практике только при условии удержания фланца либо жестким прижимом (рис. 1), либо пластичным металлом [12–15].

С учетом изложенного для описания толщины фланца при его перемещении можно использовать зависимость (3), в которой R_0 нужно заменить на R_0', а s_0 — на s_0'. При этом взаимосвязь между координатами R_0 и R_0', а также между r_0 и r_0' перемещающегося фланца определяется из условия, которое следует из первого допущения:

$$\pi\left(R_0^2 - R_0'^2\right) = \pi\left(r_0'^2 - r_0^2\right).$$

С помощью разработанной модели можно установить зависимость максимальных меридиональных напряжений $\sigma_{1\max}$, возникающих во фланце заготовки в процессе его перемещения, от коэффициента вытяжки k. Расчеты, выполненные при построении графической зависимости $\bar{\sigma}_{1\max} = \bar{\sigma}_{1\max}(k)$ для частного случая $\bar{s}_1 = 0{,}5$ и $n = 3$ (рис. 6), показывают, что предельный коэффициент вытяжки $k_0 = k = 4{,}29$, обеспечивающий $\bar{\sigma}_{1\max} = 1$ без учета перемещения фланца (точка с координатами $n = 3$, $k_0 = 4{,}29$ на графике *1* рис. 4, *а*), не реализуется, поскольку при перемещении фланца, т. е. при $k < k_0 = 4{,}29$, напряжения $\bar{\sigma}_{1\max} = 1$. Очевидно, что это приводит к отрыву фланца в самом начале процесса вытяжки.

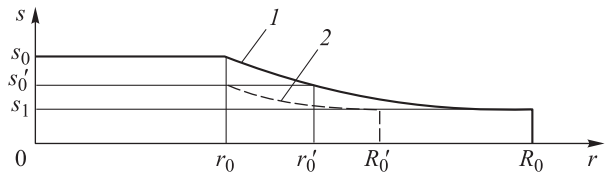


Рис. 5. Схема перемещения фланца заготовки переменной толщины с образующей вогнутой формы:
1 — исходная образующая; *2* — образующая с учетом перемещения фланца

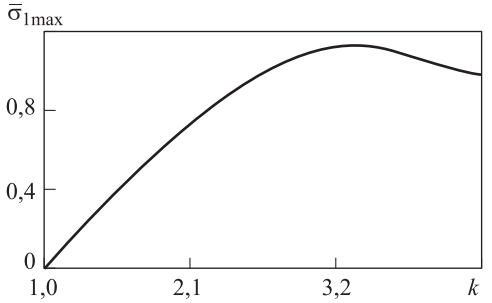


Рис. 6. Пример зависимости максимальных меридиональных напряжений $\bar{\sigma}_{1\max} = \sigma_{1\max}/\sigma_0$ от коэффициента вытяжки k при $\bar{s}_1 = 0{,}5$ и $n = 3$

По результатам расчетов также установлено, что при $k = 2{,}75$ $\bar{\sigma}_{1\max} = 1$ (см. рис. 6). Это значение k следует считать предельным коэффициентом вытяжки с учетом перемещения фланца заготовки (точка с координатами $n = 3$, $k_0 = 2{,}75$ на графике 2 рис. 4, *а*).

В рамках предложенной модели, меняя показатель степени n, характеризующий интенсивность спада толщины $\bar{s}$ дисковой заготовки вдоль радиуса $\bar{r}$, а также толщину $\bar{s}_1$ края заготовки, можно определить предельный коэффициент вытяжки с учетом перемещения фланца в широком диапазоне изменения параметров n и $\bar{s}_1$ закона (3) изменения толщины $\bar{s}(\bar{r})$ фланца дисковой заготовки. Анализ полученных результатов (см. рис. 4, кривые *2*) показывает, что наибольшее из найденных значений предельного коэффициента вытяжки $k_0 = 7{,}18$ реализуется при $n = 2$ и $\bar{s}_1 = 0$.

В целом возможные значения предельного коэффициента вытяжки k_0, обеспечивающие целостность деталей при выполнении технологической операции, расположены внутри заштрихованной области рис. 7. Она ограничена кривой *1* (соответствующей линии *2* на рис. 4, *б*) и прямой *3*, параллельной оси абсцисс и проходящей через точку $k_0 = e \approx 2{,}72$, определяющую теоретическое значение предельного коэффициента вытяжки для заготовок постоянной толщины. При любой толщине $0 \le \bar{s}_1 \le 1$ края дисковой заготовки зависимость $k_0 = k_0(n)$ будет располагаться между линиями *1* и *3* (см. рис. 7) и при $n \to \infty$ асимптотически стремиться к $e \approx 2{,}72$.

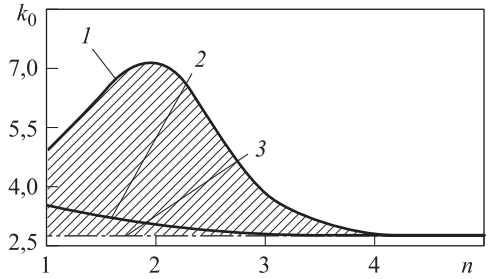


Рис. 7. Область возможных значений предельного коэффициента вытяжки k_0 при различных значениях показателя степени n и толщины края дисковой заготовки:
1 — $\overline{s}_1 = 0$; *2* — $\overline{s}_1 = 0{,}5$; *3* — $\overline{s}_1 = 1$

Самыми важными для практического применения при производстве машиностроительной продукции являются заготовки с толщиной края, удовлетворяющей условию $0{,}54 \le \overline{s}_1 \le 1{,}00$, так как они обеспечивают компенсацию естественного утолщения вытягиваемой детали и в наибольшей степени способствуют снижению ее меридиональной разнотолщинности и в конечном итоге массы [11, 13].

Расчеты показывают, что для таких заготовок максимальный коэффициент вытяжки реализуется при линейном законе распределения толщины, т. е. при $n = 1$ (см. рис. 7, кривая *2*).

Необходимо отметить, что вытяжку деталей из заготовок, геометрия которых удовлетворяет условиям $0{,}54 \le \overline{s}_1 \le 1$ и $n = 1$, можно проводить в инструментальном штампе с жестким прижимом, имеющим торец конической формы (см. рис. 1). В случаях $\overline{s}_1 < 0{,}5$ при $n = 1$, а также при $n \ge 2$ обеспечить равномерное прижатие фланца заготовки в лицевой поверхности матрицы жестким прижимом затруднительно, поэтому следует осуществлять вытяжку деталей в жесткую матрицу пластичным металлом (свинцом), который выполняет одновременно две функции — пуансона и прижима фланца [12, 14, 15].

Представляется важным отметить в рамках данной статьи возможные технологии изготовления дисковых заготовок переменной толщины. В условиях невысокой серийности производства наиболее целесообразными являются технологии, обеспечивающие переменность толщины механической обработкой на универсальных токарных или токарно-карусельных станках с ЧПУ. Для крупносерийного и массового производства заготовок переменной толщины можно рекомендовать подрезку плоского торца на универсальных или специальных токарных станках у предварительно деформированной в профилированной оправке листовой заготовки постоянной толщины.

Для обеспечения степенного закона распределения толщины фланца заготовки перспективна также технология штамповки (осадки) обкатыванием.

Выводы

1. Разработана модель расчета предельного коэффициента вытяжки осесимметричных деталей из дисковых заготовок переменной толщины с выпуклой и вогнутой образующей фланца, описываемой степенной функцией. Показано, что вогнутая образующая фланца обеспечивает большее значение предельного коэффициента вытяжки, чем выпуклая и прямолинейная.

2. Установлено, что наибольшее значение предельного коэффициента вытяжки составляет 7,18, оно обеспечивается вогнутой образующей параболической формы при нулевой толщине края фланца.

3. Показано, что для получения деталей с приблизительно постоянной толщиной стенки и обеспечения при этом максимального коэффициента вытяжки следует применять заготовки с толщиной фланца, изменяющейся по линейному закону.

4. Предложены технологии получения дисковых заготовок переменной толщины и схемы проведения вытяжки, учитывающие форму образующей фланца заготовки и серийность производства.

Литература

[1] Ковалевич М.В., Гончаров А.В., Гуков Р.Ю. Разнотолщинность цилиндрических деталей из титановых сплавов при пневмотермической формовке. *Вестник Московского авиационного института*, 2016, т. 23, № 3, с. 136–142.

[2] Ковалевич М.В. Отработка деталей на технологичность при пневмотермической формовке. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 2, с. 23–26.

[3] Волхонский А.Е., Ковалевич М.В., Гончаров А.В. Применение эффекта сверхпластичности — новые возможности в современных процессах металлообработки. *Образовательные технологии*, 2014, № 4, с. 120–128.
[4] Шемонаева Е.С., Гончаров А.В. Влияние режимов обработки на распределение толщины стенки при формовке ячеек. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2017, № 2, с. 11–16.
[5] Шемонаева Е.С. Расчеты процессов формовки крутоизогнутых патрубков. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 2, с. 32–37.
[6] Чумадин А.С., Ершов В.И., Шемонаева Е.С. Исследование процесса формовки полуторов из листовых заготовок. *Авиационная промышленность*, 2013, № 2, 33 с.
[7] Кулаков В.Г., Моисеев В.К., Шаров А.А., Ломовской О.В., Плотников А.Н. Стесненный изгиб в холодной листовой штамповке эластомером. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, т. 15, № 6(4), с. 855–860.
[8] Ларин С.Н., Нуждин Г.А., Пасынков А.А. Оценка напряженно-деформированного состояния процесса изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2016, № 11–2, с. 235–251.
[9] Мельников Э.Л., Сережкин М.А., Ступников В.В., Бодарева А.В., Аванесян В.П. Формообразование сферических, эллиптических и куполообразных днищ с минимальной разнотолщинностью стенки детали. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2016, № 12, с. 28–33.
[10] Кузнецов А.Ф., Горбунова Ю.Д., Орлов Г.А. Исследование изменения толщины стенки эллиптических тонкостенных днищ при штамповке. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2017, № 3, с. 19–23.
[11] 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.
[12] Бабурин М.А., Бараев А.В., Боярская Р.В., Тарасов В.А. Перспективы применения штамповки свинцом для снижения массы металлического лейнера баллонов высокого давления комбинированной конструкции с композитной оболочкой. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 2015, № 2, с. 18–22.
[13] 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.
[14] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Федоров С.В. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
[15] 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.

References

[1] Kovalevich M.V., Goncharov A.V., Gukov R.Iu. Raznotolshchinnost' tsilindricheskikh detalei iz titanovykh splavov pri pnevmotermicheskoi formovke [Titanium alloys cylindrical components unevenness during pneumo-thermal forming]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow aviation institute]. 2016, vol. 23, no. 3, pp. 136–142.
[2] Kovalevich M.V. Otrabotka detalei na tekhnologichnost' pri pnevmotermicheskoi formovke [Technological testing of parts made of superplasticity forming]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2015, no. 2, pp. 23–26.
[3] Volkhonskii A.E., Kovalevich M.V., Goncharov A.V. Primenenie effekta sverkhplastichnosti — novye vozmozhnosti v sovremennykh protsessakh metalloobrabotki [The effect of

superplasticity — new features in modern processes of Metalworking]. *Obrazovatel'nye tekhnologii* [Educational technology]. 2014, no. 4, pp. 120–128.

[4] Shemonaeva E.S., Goncharov A.V. Vliianie rezhimov obrabotki na raspredelenie tolshchiny stenki pri formovke iacheek [Effect of processing modes on the distribution of the wall thickness during cells' forming]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2017, no. 2, pp. 11–16.

[5] Shemonaeva E.S. Raschety protsessov formovki krutoizognutykh patrubkov [The calculation of forming processes of pipe fittings]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2015, no. 2, pp. 32–37.

[6] Chumadin A.S., Ershov V.I., Shemonaeva E.S. Issledovanie protsessa formovki polutorov iz listovykh zagotovok [Investigation in forming half-torus of sheet billets]. *Aviatsionnaia promyshlennost'* [Aviation Industry]. 2013, no. 2, pp. 33–36.

[7] Kulakov V.G., Moiseev V.K., Sharov A.A., Lomovskoi O.V., Plotnikov A.N. Stesnennyi izgib v kholodnoi listovoi shtampovke elastomerom [Constrained bending in cold sheet stamping elastomer]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 6(4), pp. 855–860.

[8] Larin S.N., Nuzhdin G.A., Pasynkov A.A. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia protsessa izotermicheskoi otbortovki v rezhime kratkovremennoi polzuchesti [Evaluation stress-strain state during isothermal flanging mode short-term creep]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU]. 2016, no. 11–2, pp. 235–251.

[9] Mel'nikov E.L., Serezhkin M.A., Stupnikov V.V., Bodareva A.V., Avanesian V.P. Formoobrazovanie sfericheskikh, ellipticheskikh i kupoloobraznykh dnishch s minimal'noi raznotolshchinnost'iu stenki detail [Shaping of spherical, elliptic and domelike bottoms with minimum crown of part wall]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia* [Repair, Reconditioning, Modernization]. 2016, no. 12, pp. 28–33.

[10] Kuznetsov A.F., Gorbunova Iu.D., Orlov G.A. Issledovanie izmeneniia tolshchiny stenki ellipticheskikh tonkostennykh dnishch pri shtampovke [The study of the wall thickness changing of thin-walled elliptical bottoms during stamping]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2017, no. 3, pp. 19–23.

[11] Baburin M.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A., Zarubina O.V. Otsenka predel'noi stepeni vytiazhki tsilindricheskikh detalei iz peremennykh po tolshchine diskovykh zagotovok [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.

[12] Baburin M.A., Baraev A.V., Boiarskaia R.V., Tarasov V.A. Perspektivy primeneniia shtampovki svintsom dlia snizheniia massy metallicheskogo leinera ballonov vysokogo davleniia kombinirovannoi konstruktsii s kompozitnoi obolochkoi [Development of lead stamping for weight reduction of the metal liner of high-pressure cylinders with combined composite shell]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2015, no. 2, pp. 18–22.

[13] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Vytiazhka metalloftoroplastovykh vtulok iz diskovykh zagotovok peremennoi tolshchiny [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.

[14] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikol'skaia Ia.M., Fedorov S.V. Primenenie profilirovannykh po tolshchine zagotovok dlia upravleniia tolshchinoi stenki shtampuemykh svintsom obolochkovykh detalei [Application of thickness-shaped billets to control wall thickness of shell parts die-stamped by lead]. *Tekhnologiia metallov* [Technology of Metals]. 2016, no. 11, pp. 2–8.

[15] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Analiz formoizmeneniia zagotovok pri vytiazhke polusfericheskikh detalei s primeneniem promezhu-

tochnykh deformiruemykh sred [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.

Статья поступила в редакцию 15.01.2018

Информация об авторах

БАБУРИН Михаил Аронович (Москва) — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: babma@mail.ru).

БАСКАКОВ Владимир Дмитриевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

ГЕРАСИМОВ Николай Викторович (Москва) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gerasimovnv@gmail.com).

ЗАРУБИНА Ольга Васильевна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ov_zarubina@mail.ru).

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

Information about the authors

BABURIN Mikhail Aronovich (Moscow) — Teaching Assistant, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: babma@mail.ru).

BASKAKOV Vladimir Dmitrievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

GERASIMOV Nikolay Viktorovich (Moscow) — Candidate of Science (Physics and Maths), Associate Professor, Physics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gerasimovnv@gmail.com).

ZARUBINA Olga Vasilievna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ov_zarubina@mail.ru).

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).