

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

А.В. Левина

nas-levina@yandex.ru

SPIN-код: 6466-2183

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

На основе решения дифференциального уравнения равновесия фланца дисковой листовой заготовки, толщина которой изменяется по закону вида логарифмического многочлена n -й степени в направлении от центра к краю, получены аналитические зависимости для оценки предельного коэффициента вытяжки. По данным зависимостям рассчитаны конкретные значения предельных коэффициентов вытяжки для двух вариаций ($n = 1$, $n = 2$) логарифмического закона распределения толщины, для которых реализуются максимально возможные значения. Выполнено сравнение полученных значений предельного коэффициента со значениями для степенного распределения вида вогнутой параболы и линейного закона распределения толщин. Проанализировано влияние смещения фланца на особенности распределения в нем меридиональных напряжений и показано, как использовать эти распределения для определения предельного коэффициента вытяжки при произвольном законе изменения толщины фланца заготовки.

Ключевые слова

Вытяжка, заготовка переменной толщины, логарифмическое распределение толщины, предельный коэффициент вытяжки, радиальные напряжения, толщина кромки дисковой заготовки, смещение фланца, перетяжное ребро матрицы

Поступила в редакцию 12.03.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Одним из перспективных направлений при совершенствовании технологии изготовления осесимметричных оболочечных деталей является использование листовых заготовок переменной толщины. Подобные заготовки находят применение при вытяжке, формовке, ротационной вытяжке металлических обечаек для ракетно-космической и специальной техники [1–6]. Применение таких заготовок позволяет получать детали с заданным распределением толщины стенки, а также позволяет улучшать технико-экономические показатели их производства.

Одной из ключевых задач, решение которой создает научную основу для сокращения числа технологических операций при вытяжке, является определение

закона изменения толщины листовой заготовки дисковой формы, при котором обеспечивается максимально возможное отношение диаметра фланца к диаметру вытягиваемого цилиндрического стакана за одну технологическую операцию, т. е. наибольшее значение предельного коэффициента вытяжки.

В данной статье рассмотрен один из важных этапов решения этой задачи — определен предельный коэффициент вытяжки для логарифмического закона изменения толщины фланца заготовки и предложен графоаналитический метод определения этого коэффициента при любом виде функции изменения толщины фланца в радиальном направлении.

Заготовка переменной толщины. В качестве геометрических параметров, характеризующих дисковую листовую заготовку переменной толщины приняты радиус R_0 , радиус r_0 области постоянной толщины s_0 заготовки (область передачи силы при вытяжке, соответствующая донной части вытягиваемой цилиндрической детали), а также толщина s_1 кромки заготовки. В области фланца радиус r и толщина $s = s(r)$ изменяются в диапазонах $r_0 \leq r \leq R_0$, $s_0 \leq s \leq s_1$. При этом образующая фланца может быть прямолинейной, вогнутой и выпуклой (соответственно линии 1, 2, 3 на рис. 1) [1]. Геометрия заготовки характеризуется следующими безразмерными параметрами: $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$, $\bar{s}(\bar{r}) = \frac{s(r)}{s_0}$, $\bar{s}_1 = \frac{s_1}{s_0}$, $k = \frac{R_0}{r_0}$; k — коэффициент вытяжки.

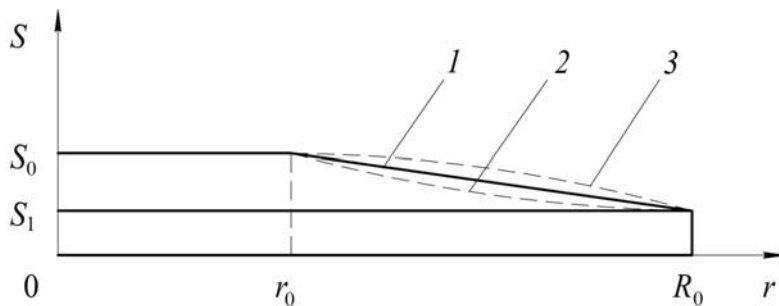


Рис. 1. Схема заготовки переменной толщины

Анализ напряженного состояния фланца. Зависимость радиальных (меридиональных) напряжений $\sigma(\bar{r})$ от радиальной координаты без учета трения заготовки о штамповую оснастку, изгиба заготовки и с использованием условия пластичности Треска — Сен-Венана имеет следующий вид [1]:

$$\bar{\sigma}(\bar{r}) = \frac{\sigma(\bar{r})}{\sigma_0} = \frac{1}{\bar{s}(\bar{r})} \left(- \int \frac{\bar{s}(\bar{r})}{\bar{r}} d\bar{r} + C_0 \right), \quad (1)$$

где σ_0 — прочностная характеристика идеального жестко-пластического тела (модель материала заготовки); C_0 — постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий: $\bar{\sigma}(\bar{r}) = 0$ при $\bar{r} = k$.

Структура выражения (1) показывает, что его аналитическое решение можно получить не только при степенном и линейном законах изменения толщины $\bar{s}(\bar{r})$ фланца (см. работы [1, 2]), но и при логарифмическом законе. Поскольку в соответствии с рис. 1 кривая профиля фланца должна проходить через две точки ($\bar{s}(1)=1$ и $\bar{s}(k)=\bar{s}_1$) и не иметь при этом особых точек в интервале $1 < \bar{r} < k$, логарифмический закон изменения толщины фланца можно записать в следующем виде (рис. 2):

$$\bar{s}(\bar{r}) = (\bar{s}_1 - 1) \left(\frac{\ln(\bar{r})}{\ln(k)} \right)^n + 1, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — показатель степени.

Анализ рис. 2 показывает, что предложенное логарифмическое распределение (2) толщины при $n = 1$ весьма близко к квадратичному распределению для вогнутых степенных образующих (вогнутая парабола), а при $n = 2$ — к линейному распределению. Поскольку в работах [1, 2] показано, что вогнутая параболическая и линейная образующие заготовки обеспечивают, соответственно, наибольший коэффициент вытяжки и практически постоянную толщину стенки вытягиваемой детали, в данной статье были проанализированы радиальные напряжения и предельный коэффициент вытяжки для распределения (2) толщины только для случаев $n = 1, 2$.

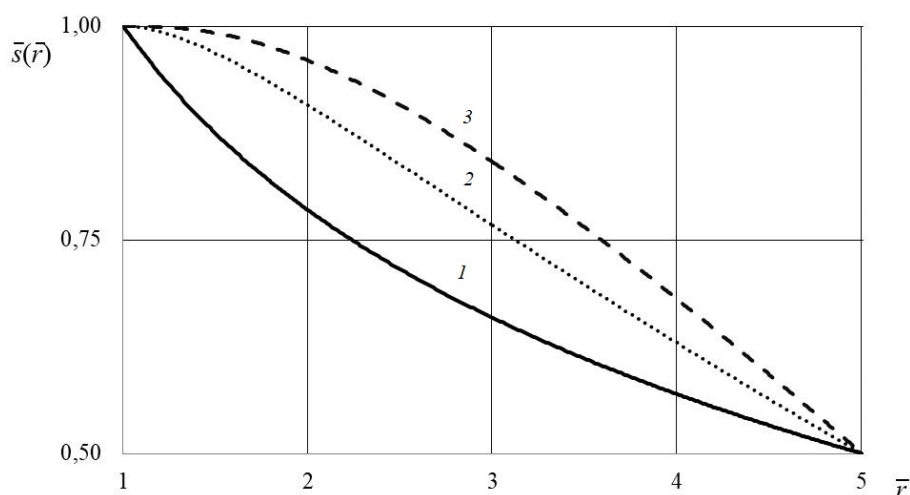


Рис. 2. Логарифмические распределения толщины $\bar{s}(\bar{r})$:

1 — $n = 1$; 2 — $n = 2$; 3 — $n = 3$

Подставляя выражение (2) в формулу (1), выполняя интегрирование и определяя C_0 из граничного условия, получаем следующую зависимость для оценки радиальных напряжений во фланце заготовки в начале вытяжки, т. е. без учета его смещения:

$$\bar{\sigma}(\bar{r}) = \frac{[\ln(\bar{r})]^{n+1} - [\ln(k)]^n \ln(\bar{r}) + [\ln(k)]^{n+1} + \bar{s}_1 [\ln(k)]^{n+1} - \bar{s}_1 [\ln(\bar{r})]^{n+1} - n [\ln(k)]^n \ln(\bar{r})}{(n+1)(\bar{s}_1 [\ln(\bar{r})]^n + [\ln(k)]^n - [\ln(\bar{r})]^n)}. \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что радиальные напряжения убывают в направлении от центра диска к краю (в области значений $1 < \bar{r} < k$), при любых действительных n отсутствуют экстремумы, точки перегиба, особые точки. Следовательно, максимальные относительные радиальные напряжения будут возникать на перетяжном ребре матрицы при $\bar{r} = 1$, и отрыв фланца (разрушение заготовки) в процессе вытяжки может произойти именно в этом опасном сечении.

Определение предельного коэффициента вытяжки без учета смещения. Чтобы определить предельно возможное значение коэффициента вытяжки k_0 , т. е. максимально возможное значение коэффициента вытяжки k , при котором не произойдет разрушения заготовки в начале вытяжки, необходимо преобразовать зависимость (3): подставить значение $\bar{r} = 1$ и правую часть зависимости приравнять к единице. В итоге получим простое и удобное для анализа уравнение, связывающее в явном виде предельный коэффициент вытяжки k_0 и толщину \bar{s}_1 кромки заготовки при любом значении n без учета смещения фланца. Это является несомненным преимуществом логарифмического распределения ее толщины по сравнению с иными законами ее изменения, для которых зависимость $k_0 = k_0(\bar{s}_1)$ можно получить только в неявном виде [1, 2]:

$$k_0(\bar{s}_1) = \exp\left(\frac{n+1}{\bar{s}_1 + n}\right). \quad (4)$$

Отметим не только простоту, но и непротиворечивость зависимости (4): при $\bar{s}_1 = 1$, т. е. для заготовки постоянной толщины, имеем: $k_0(1) = \exp(1) \approx 2,72$, что соответствует известному теоретическому пределу (см., например, [2]).

Анализ формулы (4) показывает, что с уменьшением толщины \bar{s}_1 кромки заготовки для каждого $n = 1, 2$ предельный коэффициент вытяжки k_0 монотонно возрастает и при $s_1 = 0$ достигает максимальных значений, примерно равных 7,39 и 4,48 соответственно. Значение $k_0 = 7,39$ превосходит значение предельного коэффициента вытяжки $k_0 = 7,18$, полученное в работе [1] для закона изменения толщины фланца заготовки в виде вогнутой параболы.

Учет влияния смещения фланца. Влияние смещения фланца заготовки на предельный коэффициент вытяжки k_0 проведем в рамках модели, предложенной в работе [1]. Согласно этой модели, толщина фланца в процессе его смещения при вытяжке не изменяется. Это реализуемо либо при вытяжке деталей упругой или пластичной средой [5, 7, 8], либо при вытяжке в специальном инструментальном штампе с изменяющимся прижимом, например, когда функцию прижима фланца выполняет набор концентрических колец [9]. Кроме того, при построении модели смещения фланца принимали, что перемещение края фланца не зависит от характера распределения в нем толщины и при заданном

ходе пуансона соответствует перемещению края фланца дисковой заготовки постоянной толщины.

Принятые допущения об особенностях смещения фланца позволяют применить зависимости (3), (4) для оценки радиальных напряжений $\bar{\sigma}_p$ в смещенном фланце. Опуская промежуточные преобразования, получим:

$$\bar{\sigma}_p(y) = \frac{\ln(\bar{r}) \left(\bar{s}_{1p}(y) + n \right)}{n + 1}, \quad (5)$$

где $\bar{s}_{1p}(y) = s_1/s'_0(y)$ — относительная толщина кромки в процессе смещения фланца; $y = k'_0/k_0$ — степень смещения фланца, изменяющаяся в диапазоне $1/k_0 \leq y \leq 1$; k'_0 — текущий коэффициент вытяжки с учетом смещения фланца; $s'_0(y)$ — толщина заготовки на перетяжном ребре матрицы при смещении фланца.

В силу громоздкости зависимости $\bar{s}_{1p}(y)$, $s'_0(y)$ в данной статье не приводятся.

Анализ зависимости (5) показывает, что при $n = 2$ смещение фланца не приводит к разрушению заготовки в опасном сечении на перетяжном ребре матрицы (рис. 3). В то же время при $n = 1$ с увеличением толщины кромки \bar{s}_1 наблюдается разрушение заготовки (отрыв фланца). Например, при $\bar{s}_1 = 0,5$ разрушение наблюдается в диапазоне $0,84 \leq y \leq 1$, поскольку в данной области $\bar{\sigma}_p(y)$ превосходят σ_0 (рис. 4). Кроме того, расчеты показывают, что при $\bar{s}_1 = 0$ и $n = 1$ смещение фланца не меняет значение предельного коэффициента вытяжки $k_0 = 7,39$, найденного без учета смещения фланца. Это величина k_0 является наибольшей из оцененных ранее [1].

Методика. На основе выполненных исследований можно предложить методику определения предельного коэффициента вытяжки k_0 для произвольного закона распределения толщины фланца заготовки. Согласно этой методике, для заданного закона $\bar{s}(\bar{r})$ изменения толщины фланца определяют k_0 без учета его смещения и строят график зависимости $\bar{\sigma}_p(y)$ по аналогии с логарифмическим законом (2) распределения толщины. Если $\bar{\sigma}_p(y) < 1$ в диапазоне $1/k_0 \leq y < 1$, то смещение фланца не влияет на найденное значение k_0 предельного коэффициента вытяжки. Если $\bar{\sigma}_p(y) > 1$ в любой области диапазона $1/k_0 \leq y < 1$, то определяют координату $y = y_1$, при которой $\bar{\sigma}_p(y_1) = 1$. В этом случае предельный коэффициент вытяжки следует скорректировать и определять его как $k_{01} = y_1 k_0$.

Способы получения дисковых листовых заготовок переменной толщины. Заготовки переменной толщины со сложным законом ее распределения можно получать пластическим деформированием, а также с помощью различных технологий размерной обработки. Для повышения производительности механической обработки при производстве заготовок переменной толщины можно применить, например, способ, основанный на подрезке торца предварительно деформированной дисковой заготовки непосредственно на токарном станке [10].

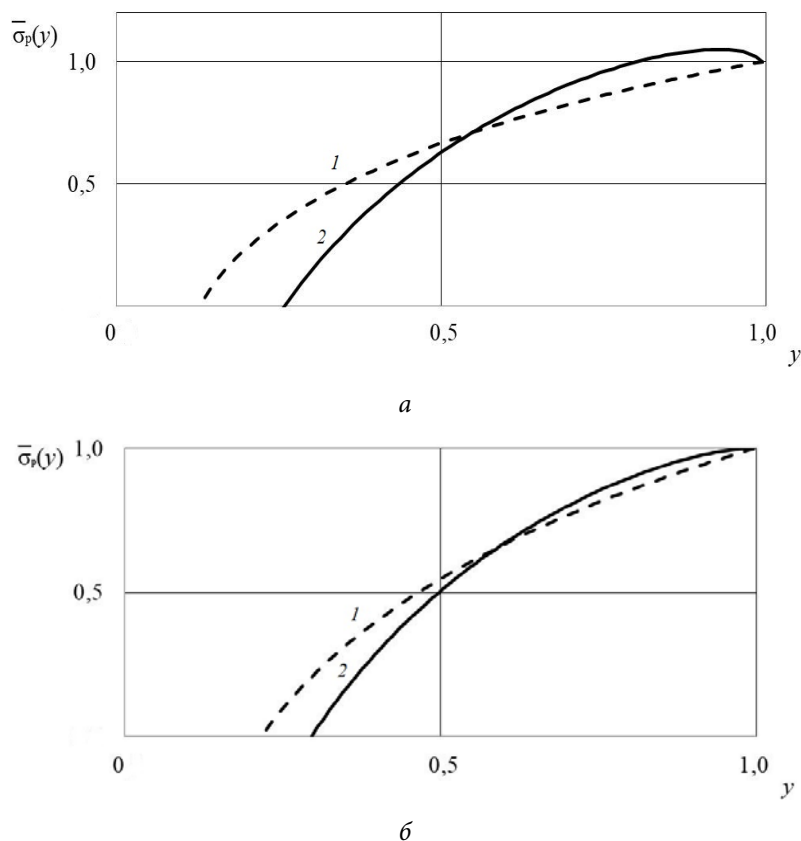


Рис. 3. Зависимость $\bar{\sigma}_p = \bar{\sigma}_p(y)$ при разных значениях \bar{s}_1 :

$a - n = 1$, кривая 1 — $\bar{s}_1 = 0$; кривая 2 — $\bar{s}_1 = 0,5$;

$b - n = 2$, кривая 1 — $\bar{s}_1 = 0$; кривая 2 — $\bar{s}_1 = 0,5$

Заключение. В результате проведенных исследований разработаны зависимости для оценки предельного коэффициента вытяжки при логарифмическом законе изменения толщины фланца заготовки с учетом и без учета его смещения в процессе вытяжки. На основе полученных зависимостей предложен графоаналитический метод расчета предельного коэффициента вытяжки для произвольного закона распределения толщины фланца.

Литература

- [1] 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, с. 10–18.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Drawing of metalfluoraplastic sleeves from disk workpieces of variable thickness. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 7, с. 16–22.
- [5] 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.
- [6] Чумадин А.С. *Теория и расчеты процессов листовой штамповки (для инженеров)*. Москва, 2014, Экспосервис ВИП, 216 с.
- [7] 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.
- [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 2623510 РФ. Заявл. 04.04.2016.
- [9] Сизов Е.С., Бабурин М.А., Сизова К.Г. Штамп для глубокой вытяжки. Авторское свидетельство на изобретение SU 1201024 А. 30.12.1985.
- [10] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Васильева Т.В. Способ изготовления листовых профилированных по толщине заготовок для глубокой вытяжки. Патент RUS 2595307 РФ. Заявл. 14.04.2015.

Левина Анастасия Владимировна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

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.

GRAPHOANALYTICAL METHOD OF DEFINING THE LIMITING RATIO OF DRAWING THE WORKPIECES FROM THE TAPERED THICKNESS BLANKS

A.V. Levina

nas-levina@yandex.ru

SPIN-code: 6466-2183

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

Following the solution of the equilibrium differential equation for the flange of the disk-shaped blank, the thickness of which changes by the law of the logarithmic n -power polynomial in the direction from the center to the edge, we obtained analytic dependences for estimating the limiting drawing ratio. Through these dependences we calculated the specific values of the limiting drawing ratios for two variations ($n = 1$, $n = 2$) of the logarithmic thickness distribution law, for which the maximum possible values are realized. The article compares the obtained marginal coefficient values with the values for the power-series distribution of the concave parabola kind and the linear law of thickness distribution. We analyze the impact of the flange shift on the peculiar features of the meridional stress distribution in it and show how to use these distributions for estimating the limiting drawing ratio with the arbitrary law of changing the thickness of the workpiece flange.

Keywords

Drawing, tapered thickness workpiece, logarithmic thickness distribution, limiting drawing ratio, radial stresses, the thickness of the disk-shaped blank edge, flange shift, matrix drawbead

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Matematicheskaya model' rascheta predelnogo koeffitsienta vytyazhki tsilindricheskikh detaley iz listovykh zagotovok peremennoy tolshchiny. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2018, no. 4, pp. 10–18.
- [2] 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.
- [3] Kuznetsov A.F., Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. 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.

- [4] 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.
- [5] 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* [Technology of Metals], 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [6] Chumadin A.S. Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki (dlya inzhenerov) [Theory and calculation of sheet-stamping process (for engineers)]. Moscow, 2014, Eksposervis VIP publ., 216 p.
- [7] 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.
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Fedorov S.V., Nikol'skaya Ya.M. Sposob shtampovki-vytyazhki obolocheknykh listovykh detaley plastichnym metallom [Method of shell parts drawing of plastic metal]. Patent 2623510 RF. Appl. 04.04.2016.
- [9] Sizov E.S., Baburin M.A., Sizova K.G. Shtamp dlya glubokoy vytyazhki [Die block for deep drawing]. Avtorskoe svidetel'stvo na izobretenie SU 1201024 A [Inventor's certificate SU 1201024 A]. 30.12.1985.
- [10] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Vasil'yeva T.V. Sposob izgotovleniya listovykh profilirovannykh po tolshchine zagotovok dlya glubokoy vytyazhki [Method for production sheet thickness-graded workpieces for deep drawing]. Patent RUS 2595307 RF. Appl. 14.04.2015.

Levina A.V. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Storozhilov V.A. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Fonarev D.A. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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

Scientific advisor — M.A. Baburin, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.