

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОЛОГИХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ**

Д.А. Фонарев

denisfon@rambler.ru

SPIN-код: 5349-8329

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

**Аннотация**

Методом конечных элементов в программной среде DEFORM численно смоделирован и исследован процесс формообразования заготовок пологих деталей типа «сферический мениск» по трем различным схемам штамповки: в инструментальном штампе, при деформировании свинцовым блоком с плоским торцом и при деформировании свинцовым блоком с предусмотренной в нем конической полостью. Описаны принципы работы в программной среде DEFORM в приложении к поставленной задаче. Установлен характер распределения толщины заготовки в ее меридиональном сечении, дано возможное объяснение полученных результатов. Обоснована целесообразность использования профилированного свинца в качестве деформирующей среды.

**Ключевые слова**

Формообразование, штамповка, свинец, инструментальный штамп, моделирование процесса вытяжки, распределение толщины стенки, дисковая заготовка, численные методы моделирования, мениск, коэффициент вытяжки

Поступила в редакцию 18.06.2019

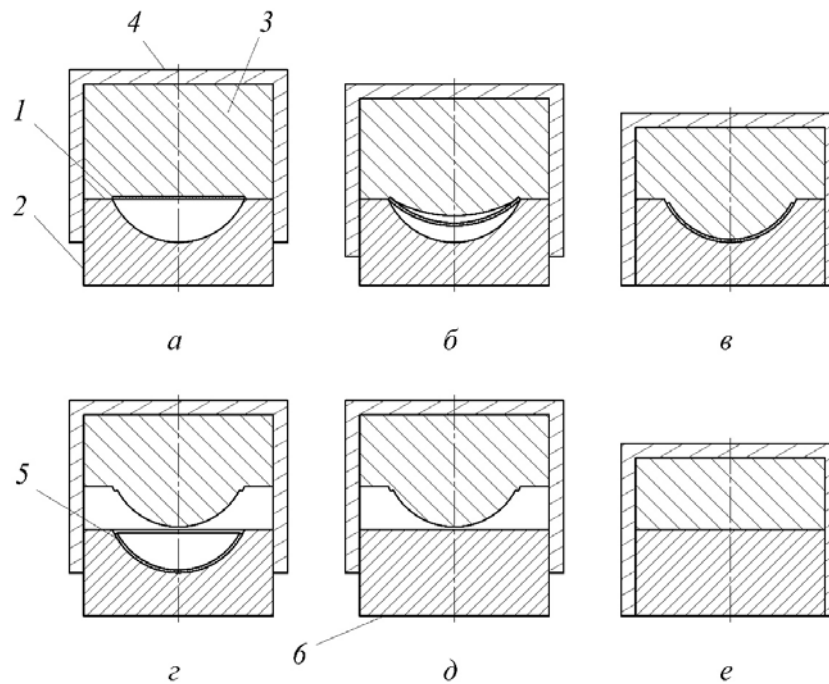
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

**Введение.** Применение свинца в качестве деформирующей среды в процессе штамповки пологих заготовок типа «сферический мениск» является перспективным направлением улучшения массовых и прочностных характеристик деталей летательных аппаратов и изделий специальной техники, таких как штампо-сварные топливные баки различной конфигурации, детали трубопроводов и др. Использование свинца в качестве деформирующей среды обеспечивает более равномерный характер распределения толщины стенки по сравнению с аналогичными деталями, полученными штамповкой в инструментальном штампе [1–3].

Помимо аналитических [5–9] и экспериментальных методов исследования процесса штамповки деталей из листовых заготовок, представляется целесообразным применение численных расчетных методов. С их помощью можно полностью моделировать процесс штамповки, 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, определить точную геометрию полученной детали и оценить степень ее отклонения от требований конструкторской документации [3, 4].

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, модели деформирования материалов, геометрические параметры штамповой оснастки, характеристики трения между соприкасающимися поверхностями, настраивать сетку конечных элементов, задавать закон движения инструмента и ряд дополнительных условий, при которых может протекать процесс штамповки.

В данной статье в программном комплексе DEFORM исследован процесс штамповки детали типа «мениск» из дисковой листовой заготовки по трем различным схемам — в инструментальном штампе, при деформировании свинцовым блоком с плоским торцом и при деформировании свинцом с предусмотренной в нем конической полостью.



**Рис. 1.** Схема процесса формообразования деталей типа «мениск» пластичной средой:

- а* — исходное положение; *б, в* — промежуточная и завершающая стадии штамповки;  
*г* — размыкание штампа для извлечения заготовки; *д* — замена рабочей матрицы на разглаживающую; *е* — разглаживание свинца; 1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — пластичная среда; 4 — пресс-контейнер; 5 — деталь; 6 — разглаживающий пуансон

Суть типового процесса формообразования оболочечных деталей свинцом заключается в следующем. Листовая заготовка 1 устанавливается на рабочую матрицу 2. При рабочем ходе пресс-контейнер 4 с пластичной средой 3 опускается вниз, и заготовка 1 вместе с матрицей 2 вдавливается в пластичный металл, который вместе с заготовкой течет в рабочую полость матрицы 2. В результате

происходит свертка заготовки в полое изделие 5. По окончании вытяжки пластичный металл, принявший форму внутренней полости жесткой металлической матрицы 2, обжимается плоской разглаживающей матрицей 6 (рис. 1). После этого цикл штамповки может повторяться.

Схему штамповки свинцом можно модернизировать, сформировав в свинце на стадии разглаживания осесимметричную полость.

Цель исследований — установить влияние типовой и модернизированной схем деформирования свинцом дисковой заготовки на изменение толщины детали в меридиональном направлении.

**Начальные условия.** Штамповка осуществлялась путем движения инструмента — либо жесткого металлического пуансона, либо пресс-контейнера с свинцом. Скорость инструмента составляла  $V_x = 0,1$  мм/с. Заготовка из пластичной стали толщиной  $S_0 = 0,5$  мм и диаметром  $D = 60$  мм, постепенно принимала форму матрицы радиусом  $R_M = 50$  мм по мере передачи давления от инструмента (рис. 2). При этом матрица, инструментальный штамп и пресс-контейнер были приняты абсолютно жесткими.

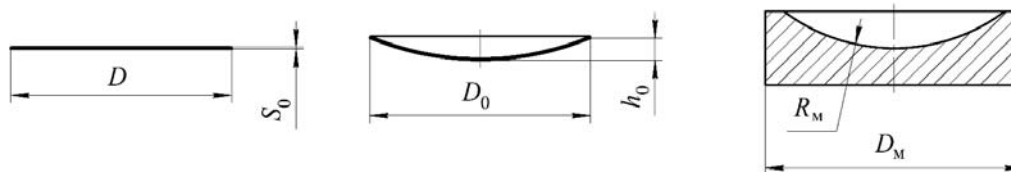


Рис. 2. Схема заготовки, конечной детали и матрицы:

*a* — дисковая заготовка; *б* — отштампованная деталь; *в* — матрица

Трение в парах свинец – заготовка и матрица – заготовка задавали разными законами.

В паре свинец – заготовка трение задавали согласно закону трения Зибеля, связывающему возникновение сил трения с пластической деформацией поверхностного слоя металла:

$$t = f_{\sigma} \sigma_T,$$

где  $f_{\sigma}$  — показатель сил трения;  $\sigma_T$  — предел текучести деформируемого металла. Коэффициент трения в данной паре принимали равным 0,5.

В паре матрица – заготовка трение задавали по закону Кулона:

$$t = f'p + a,$$

где  $a$  — удельное значение сопротивления скольжению, обусловленное адгезионным взаимодействием [10]. В такой паре коэффициент трения принимали равным 0,09.

Для всех трех схем были приняты общие геометрические параметры заготовки и матрицы. Полученные результаты имеют модельный характер, что позволяет приложить их к реальным изделиям авиационной и ракетно-космической техники.

В ходе расчетов исследовали влияние использования свинца на процесс формообразования деталей типа «пологий мениск». Известно, что на характер распределения толщины стенки влияет коэффициент вытяжки  $k$  детали [4–8]. Чем он меньше, тем более равномерным будет характер распределения толщины. В данной статье под полой понимается такая деталь, коэффициент вытяжки  $k = D/D_0$  которой не превышает значения 1,1.

Такому коэффициенту вытяжки  $k = 1,1$ , исходя из соотношения равенства площадей поверхности заготовки и конечной детали (при толщине детали равной толщине исходной дисковой заготовки), соответствует деталь, у которой отношение высоты к диаметру  $\bar{h}_0 = h_0/D_0 \approx 0,23$  (рис. 3).

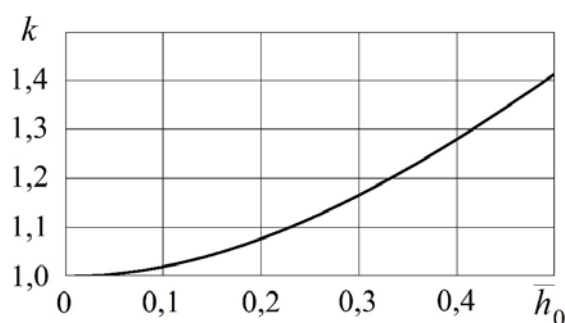


Рис. 3. Зависимость коэффициента вытяжки  $k$  от относительной высоты детали  $\bar{h}_0$

Процесс штамповки численно моделировали по трем различным схемам. В случае штамповки в инструментальном штампе был использован недеформируемый пуансон с радиусом 49,5 мм. Штамповку пластичным металлом осуществляли в двух вариантах, различающихся тем, что в одном из вариантов в теле свинца была предусмотрена коническая полость, соразмерная с габаритами конечной детали (рис. 4).

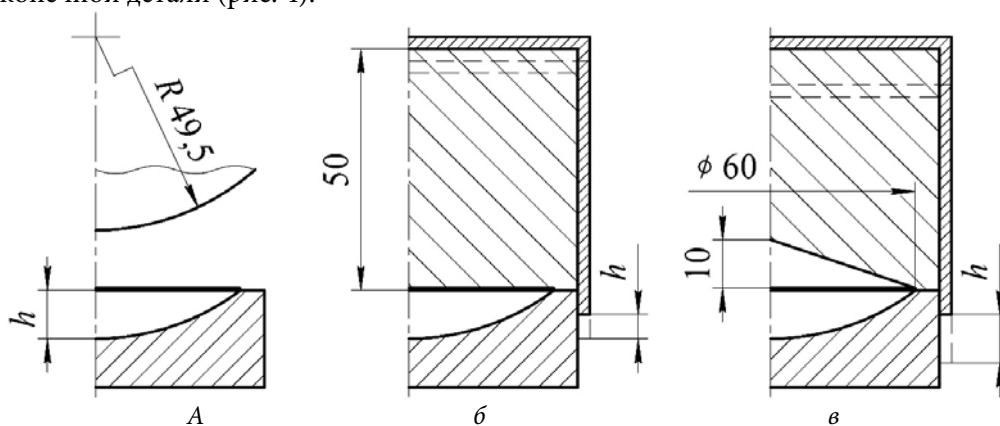
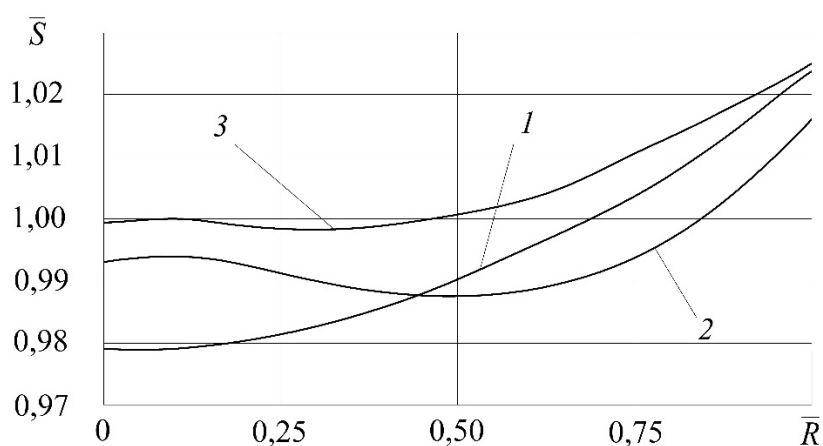


Рис. 4. Проанализированные схемы штамповки:

- a* — в инструментальном штампе; *b* — пластичным металлом без полости;  
*в* — пластичным металлом с предусмотренной конической полостью

**Результаты моделирования процесса штамповки пологих деталей типа «мениск».** Программный комплекс DEFORM позволяет анализировать результаты расчетов по разным параметрам, выводя их как в самом комплексе в виде графиков или цветowych карт, так и в текстовые файлы или таблицы Excel.

В данном случае результаты были выведены в таблицу, и по этим данным были построены кривые распределения толщины детали в ее меридиональном направлении для каждой из трех схем (рис. 5).



**Рис. 5.** Кривые распределения относительной толщины стенки детали  $\bar{S} = S/\bar{S}_0$  в меридиональном направлении:

- 1 — при штамповке в инструментальном штампе; 2 — при штамповке свинцом без полости;  
3 — при штамповке свинцом с конической полостью

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5, показал, что при штамповке в инструментальном штампе разнотолщинность (разность максимального и минимального значения толщины стенки детали, деленная на номинальную толщину заготовки  $S_0$ ) составила 4,3 %, при штамповке свинцом без полости — 2,9 % и при штамповке свинцом с полостью — 2,2 %. В случае штамповки свинцом с конической полостью толщина стенки в центральной части отштампованной детали крайне слабо отличается от номинальной толщины заготовки.

Такой результат может быть объяснен тем, что во всех трех случаях взаимодействие инструмента с центральной частью заготовки происходит в разный момент времени (чем позже происходит контакт, тем благоприятнее будет характер распределения толщины стенки детали). В случае штамповки в инструментальном штампе взаимодействие пуансона с заготовкой начинается с центральной области заготовки и сам процесс деформирования происходит не по всей сферической поверхности инструмента, а только по двум кольцевым участкам, отстоящим друг от друга на некоторое расстояние.

При штамповке свинцом взаимодействие свинца с заготовкой начинается на краю заготовки, сам контакт осуществляется по сферической поверхности,

повторяющей форму матрицы. Контакт инструмента с центральной частью заготовки оттягивается и происходит ближе к концу процесса штамповки. Наличие в свинцовом блоке конической полости позволяет оттянуть момент контакта свинца с заготовкой практически к самому концу процесса штамповки.

Анализ полученных закономерностей позволяет говорить о том, что использование свинца в качестве деформирующей среды положительно влияет на характер распределения толщины стенки детали, при этом наиболее благоприятного распределения можно добиться, предусмотрев изначально в свинце полость конической формы.

**Выводы.** На основе полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования свинца в качестве деформирующей среды при штамповке деталей типа «пологий мениск». Штамповка детали свинцом позволяет снизить ее разнотолщинность на 33 % по сравнению с деталью, полученной в инструментальном штампе. При этом более равномерного характера распределения толщины стенки детали можно добиться путем деформирования заготовки по схеме, предусматривающей наличие конической полости в свинце. Полость позволяет отдалить момент контакта свинца с купольной частью заготовки, что позволяет уменьшить разнотолщинность детали.

#### Литература

- [1] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. и др. Способ штамповки-вытяжки оболочечных листовых деталей пластичным металлом. Патент 2016112586 РФ. Заявл. 04.04.2016, опубл. 27.06.2017.
- [2] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В. и др. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2014, № 7, с. 21–24.
- [3] Бабурин М.А., Колпаков В.И., Вышегородцева А.С. и др. Численное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей из листовых заготовок методом вытяжки пластичным металлом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 11(71). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-11-1696 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/fte/1696.html>
- [4] Сторожилов В.А., Фонарев Д.А. Численный анализ процесса деформирования листовых заготовок переменной толщины при вытяжке цилиндрических деталей. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молодежной конф.* М., Диона, 2018, с. 183–187.
- [5] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. и др. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [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(21). DOI: 10.18698/2541-8009-2018-4-288 URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/form/288.html>

- [7] Бабури́н М.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. и др. Оценка предельной степени вытяжки цилиндрических деталей из переменных по толщине дисковых заготовок. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 1, с. 3–6.
- [8] Бабури́н М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В. и др. Математическая модель расчета предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 4(697), с. 10–18. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-10-18 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/calcmach/hidden/1533.html>
- [9] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Drawing of metalfluoraplastic sleeves from disk workpieces of variable thickness. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 7, с. 16–22.
- [10] Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М., Металлургия, 1982.

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

---

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE THICKNESS VARIATION OF SHALLOW PARENT SHEETS OF AIRCRAFT PARTS FOR VARIOUS PATTERNS OF THE STAMPING PROCESS

D.A. Fonarev

denisfon@rambler.ru

SPIN-code: 5349-8329

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

*Using the finite element method in the DEFORM software environment, we numerically simulated and investigated the process of forming blanks of shallow parts of the "spherical meniscus" type according to three different stamping schemes: in tool stamping, with deformation by a lead block with a flat end, and with deformation by a lead block with a conical cavity provided in it. The principles of work in the DEFORM software environment within the framework of the task are described. The nature of the distribution of the blank thickness in its meridional section is established, a possible explanation of the results is given. The expediency of using profiled lead as a deforming medium is substantiated.*

**Keywords**

*Forming, stamping, lead, tool stamp, modeling of the drawing process, distribution of wall thickness, disk blanks, numerical modeling methods, meniscus, drawing coefficient*

Received 18.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

**References**

- [1] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., et al. Sposob shtampovki-vytyazhki obolocheknykh listovykh detaley plastichnym metallom [Extrusion method for shell sheet parts from plastic metal]. Patent 2016112586 RF. Appl. 04.04.2016, publ. 27.06.2017 (in Russ.).
- [2] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., et al. Analysis of workpieces form changing at the drawing of hemispherical parts with the application of intermediate deformed media. *Kuznechno shtampovnochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure], 2014, no. 7, pp. 21–24 (in Russ.).
- [3] Baburin M.A., Kolpakov V.I., Vyshegorodtseva A.S., et al. Numerical modeling of the process of stamping axisymmetric parts from sheet blanks by extraction with plastic metal. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 11(71). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-11-1696 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/fte/1696.html> (in Russ.).
- [4] Storozhilov V.A., Fonarev D.A. [Researching of the cylindrical detail drawing process from workpieces with variable thicknesses by a numerical method]. *Novye podkhody i tekhnologii projektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molodezhnoy konf.* [New approaches to technology of production, tests and industrial design of rocket-space technique. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona, 2018, pp. 183–187 (in Russ.).



- [5] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., et al. Application of thickness-shaped workpieces to control the wall thickness of lead-formed shell parts. *Tekhnologiya metallov*, 2016, no. 11, pp. 2–8 (in Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2017, vol. 2017, no. 13, pp. 1136–1140. DOI: 10.1134/S0036029517130031 URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0036029517130031>)
- [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. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 4(21). DOI: 10.18698/2541-8009-2018-4-288 URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/form/288.html> (in Russ.).
- [7] Baburin M.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A., et al. 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 (in Russ.).
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., et al. 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. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-10-18 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/calcmach/hidden/1533.html> (in Russ.).
- [9] 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.
- [10] Grudev A.P., Zil'berg Yu.V., Tiliik V.T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and greasing at metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982 (in Russ.).

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

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

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