

## Особенности проектирования и изготовления листовых заготовок переменной толщины для вытяжки деталей летательных аппаратов

© М.А. Бабурин, В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложены рекомендации по проектированию и изготовлению дисковых заготовок переменной толщины из листового металла, которые обеспечивают уменьшение разнотолщинности деталей, получаемых вытяжкой. Научная новизна результатов выполненных исследований заключается в установлении закономерностей, описывающих изменение толщины стенки и высоты цилиндрических деталей в зависимости от геометрических параметров применяемых дисковых заготовок, толщина которых уменьшается в направлении от центра к краю. Исследования проводились методом численного моделирования вытяжки с использованием программного комплекса DEFORM. Значение предельного коэффициента вытяжки определяли на основе решения дифференциального уравнения равновесия фланца заготовки переменной толщины. Установлено, что заготовки, характеризующиеся линейным законом изменения толщины, позволяют компенсировать увеличение толщины фланца деталей в процессе вытяжки и снизить их разнотолщинность более чем в 3 раза. Показано, что из дисковых заготовок, характеризующихся линейным законом изменения толщины, можно получать детали, стенки которых имеют не только постоянную, но и дигрессивную толщину. Для сокращения числа вытяжных операций предложено использовать дисковые заготовки, характеризующиеся как линейным, так и параболическим и логарифмическим законами изменения толщины. Для изготовления дисковых заготовок переменной толщины рекомендована технология их механической обработки в деформированном состоянии.*

**Ключевые слова:** дисковая заготовка, предельный коэффициент вытяжки, разнотолщинность, толщина края заготовки, закон изменения толщины

Одна из важных проблем, решаемых при производстве ракетно-космической и авиационной техники, — уменьшение разнотолщинности металлических деталей, изготавливаемых листовой штамповкой. Утонение и утолщение листовых деталей в процессе формообразования представляется вполне естественным явлением, во многом обусловленным особенностями деформирования заготовки и характером силового воздействия на металл технологической оснастки. При отработанных технологиях серийного производства минимальная толщина  $s_{\min}$  штампуемых деталей в донной части может достигать 0,85–0,90 номинальной толщины  $s_0$  листового металла, а максимальная толщина  $s_{\max}$  со стороны открытого края детали превышать значение  $s_0$  в 1,2–1,3 раза [1–12]. Чтобы обеспечить прочность лис-

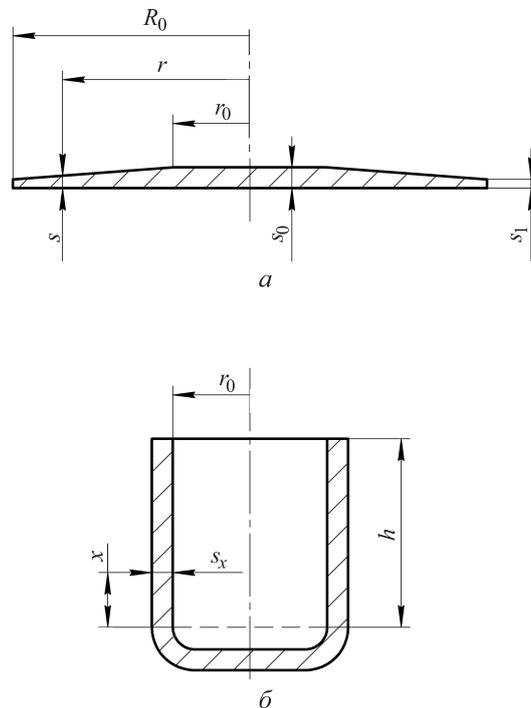
товых деталей летательных аппаратов, утонение металла обычно компенсируют увеличением его номинальной толщины  $s_0$ , что приводит к избыточности массы летательного аппарата.

Цель статьи — разработка рекомендаций по проектированию конструкции и технологии изготовления дисковых заготовок переменной толщины для вытяжки в инструментальных штампах деталей с уменьшенной разнотолщинностью.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что для уменьшения разнотолщинности  $\Delta s = s_{\max} - s_{\min}$  деталей при вытяжке наиболее рационально применение заготовки, характеризующейся линейным законом изменения толщины в направлении от центра к краю (т. е. линейным утонением) [13–16]:

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

где  $\bar{s} = s / s_0$ ;  $\bar{r} = r / r_0$ ;  $\bar{s}_1 = s_1 / s_0$ ;  $k = R_0 / r_0$  — коэффициент вытяжки;  $R_0$ ,  $r_0$  — радиусы заготовки и детали;  $s$  — толщина заготовки для радиуса  $r$ ;  $s_1$  — толщина края дисковой заготовки (рис. 1).



**Рис. 1.** Геометрические параметры дисковой заготовки переменной толщины (а) и вытягиваемой цилиндрической детали (б)

Области определения безразмерных величин  $\bar{r}$ ,  $\bar{s}$ ,  $\bar{s}_1$  следующие:

$$1 \leq \bar{r} \leq k, \quad \bar{s}_1 \leq \bar{s} \leq 1, \quad 0 \leq \bar{s}_1 \leq 1.$$

Можно показать, что для одновременного обеспечения целостности цилиндрических деталей и компенсации утолщения их открытого края при вытяжке геометрические параметры деталей и заготовок должны удовлетворять следующим условиям [13–15]:

$$k = \frac{1}{\bar{s}_1^2}, \quad k < \frac{k_0^* k_0}{e}, \quad (2)$$

здесь  $k_0^*$  — рекомендуемое в справочной литературе экспериментальное значение предельного коэффициента вытяжки;  $k_0$  — теоретическое значение предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из заготовок, характеризующихся линейным законом изменения толщины;  $e \approx 2,72$  — основание натуральных логарифмов.

Для оценки максимально возможного значения предельного коэффициента вытяжки  $k_0$  разработано соотношение, связывающее относительную толщину  $\bar{s}_1$  края заготовки с величиной  $k_0$ :

$$\bar{s}_1 = \frac{k_0 \ln k_0 - 2k_0 + 2}{\ln k_0 - k_0 + 1}. \quad (3)$$

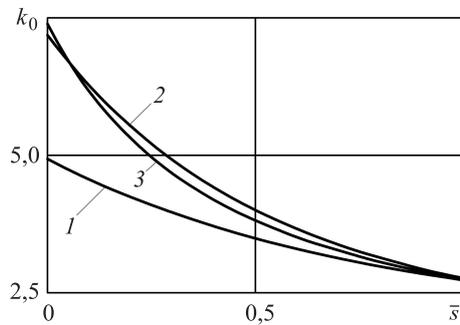
Соотношение (3) получено на основе решения дифференциального уравнения равновесия фланца дисковой листовой заготовки, характеризующейся линейным законом изменения толщины (1), с учетом условия пластичности Треска — Сен-Венана. При этом сжатие фланца по толщине, его изгиб на перетяжном ребре матрицы и силы трения не учитывались.

Для удобства практического применения выражение (3) целесообразно представить в виде графика  $k_0 = k_0(\bar{s}_1)$  (кривая 1 на рис. 2).

Предлагается следующий порядок применения зависимостей (2), (3) при проектировании дисковой заготовки, характеризующейся линейным законом (1) изменения толщины, для вытяжки за одну операцию цилиндрического стакана со стенкой постоянной толщины.

Пусть заданы радиус  $r_0$  детали, высота  $h$  ее цилиндрической части и толщина стенки  $s_0$  (см. рис. 1). Будем применять для вытяжки детали лист металла толщиной  $s_0$ . На первом этапе определяем радиус  $R_0$  дисковой заготовки по рекомендациям, приведенным в справочной литературе, и оцениваем коэффициент вытяжки  $k$ . Например, если не учитывать область сопряжения между дном стакана и его цилиндриче-

ской частью, то  $k = \sqrt{1 + 2h/r_0}$ . Далее вычисляем требуемую для обеспечения постоянства толщины стенки  $s_x$  детали относительную толщину края  $\bar{s}_1 = 1/\sqrt{k}$  дисковой заготовки. После этого по формуле (3) или с помощью кривой 1 на рис. 2 оцениваем теоретическое значение предельного коэффициента вытяжки  $k_0$ . Затем проверяем соблюдение ограничения на значение  $k$  в соответствии с условиями (2). Если ограничение соблюдается, то проектирование заготовки завершается и ее геометрические параметры  $R_0$  и  $s_1$  принимают следующие значения:  $R_0 = kr_0$ ,  $s_1 = \bar{s}_1 s_0$ .



**Рис. 2.** Зависимость предельного коэффициента вытяжки  $k_0$  от толщины края  $\bar{s}_1$  заготовки при различных законах изменения ее толщины: 1 — линейный закон (1); 2, 3 — параболический и логарифмический законы (4)

Несоблюдение ограничения (2) на значение  $k$  указывает на то, что дисковая заготовка переменной толщины при вытяжке детали разрушится, т. е. за одну вытяжную операцию получить деталь, имеющую постоянную толщину  $s_0$  и требуемые габаритные размеры  $r_0$  и  $h$ , не удастся и следует проводить многооперационную вытяжку.

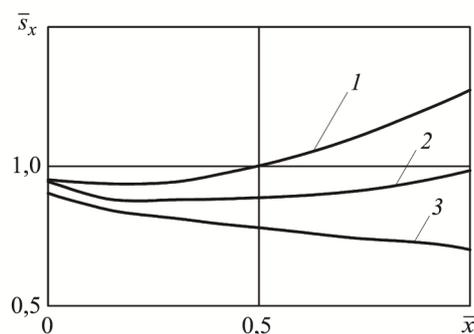
Для дополнительного обоснования возможности получить вытяжкой в инструментальном штампе цилиндрические детали уменьшенной разнотолщинности из дисковых заготовок с линейным утонением (1) были проведены численные исследования с помощью программного комплекса DEFORM. При проведении исследований обеспечивалась близость расчетных и реальных условий выполнения вытяжки. Было принято, что материал вытягиваемого стакана — пластичная сталь марки 08 кп, его радиус  $r_0 = 25$  мм, радиус применяемой заготовки  $R_0 = 48$  мм (коэффициент вытяжки  $k = 1,92$ ), толщина

листового металла  $s_0 = 0,95$  мм. Радиус перетяжного ребра матрицы назначали 3 мм, радиус сопряжения цилиндрической и плоской поверхностей вытяжного пуансона — 5 мм. Радиальный зазор между наружной поверхностью пуансона и проходным сечением матрицы, составляющий 1,25 мм, создавал условия для свободного прохождения через него металла заготовки в процессе вытяжки. Коэффициент трения между пуансоном и заготовкой задавали  $\mu_1 = 0,25$ , между заготовкой и остальными элементами оснастки (матрица, прижим) —  $\mu_2 = 0,09$ . Со стороны прижима на фланец заготовки в процессе вытяжки действовала постоянная сила прижима  $Q = 1,35$  кН.

Выполненные численные расчеты показали, что относительная разнотолщинность  $\overline{\Delta s} = \Delta s/s_0$  цилиндрической части детали при использовании заготовки постоянной толщины, т. е. при  $\overline{s}_1 = 1$ , составляет  $\overline{\Delta s} = 0,328$ . Если применять для вытяжки заготовку с линейным утонением, у которой относительная толщина на краю  $\overline{s}_1 = 0,7$  (что близко к теоретическому значению  $\overline{s}_1 = 1/\sqrt{k} = 0,72$ , необходимому для обеспечения постоянной толщины стенки стакана), то относительная разнотолщинность детали уменьшится более чем в 3 раза и составит  $\overline{\Delta s} = 0,104$ .

Распределение относительной толщины  $\overline{s}_x = s_x/s_0 = \overline{s}_x(\overline{x})$  ( $\overline{x} = x/h$ ,  $x$  — осевая координата цилиндрической части детали в направлении от ее донной части к открытому краю, изменяющаяся в диапазоне  $0 \leq x \leq h$ ) стенки вытянутой детали вдоль ее цилиндрической части для  $\overline{s}_1 = 1$  и  $\overline{s}_1 = 0,7$  характеризуют кривые соответственно 1 и 2 на рис. 3. Для дальнейшего уменьшения разнотолщинности детали можно рекомендовать в качестве завершающей формообразующей операции вытяжку с принудительным утонением металла в области цилиндрической стенки [14].

Выполненные исследования показали, что с помощью заготовок с линейным утонением фланца можно вытягивать цилиндрические детали дигрессивной толщины, уменьшающейся в направлении от дна цилиндра к его открытому краю. Например, в случае применения заготовки, у которой  $\overline{s}_1 = 0,5$ , численные расчеты демонстрируют возможность вытяжки стакана с практически линейным изменением толщины стенки  $\overline{s}_x = \overline{s}_x(\overline{x})$  в направлении от его донной части к открытому краю (кривая 3 на рис. 3). Подобное, дигрессивное, распределение толщины требуется обеспечить, например, у кумулятивных облицовок сферической формы с удлиненным цилиндрическим основанием, чтобы получить возможность управлять процессом формирования кумулятивных поражающих элементов [17].



**Рис. 3.** Распределение относительной толщины  $\bar{s}_x$  цилиндрической стенки вытянутой детали вдоль осевой координаты  $\bar{x}$  при различных значениях относительной толщины  $\bar{s}_1$  края дисковой заготовки:

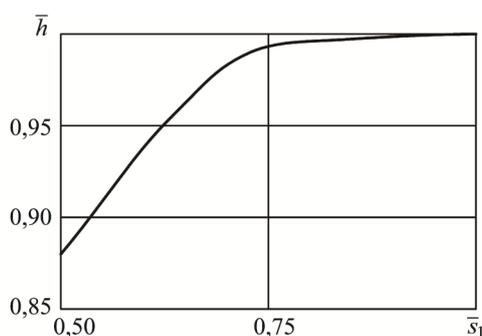
1 —  $\bar{s}_1 = 1$ ; 2 —  $\bar{s}_1 = 0,7$ ; 3 —  $\bar{s}_1 = 0,5$

Численные расчеты показывают, что обеспечение дигрессивной толщины сопровождается утонением детали в области перехода донной части в цилиндрическую и уменьшением относительной толщины до значения  $\bar{s}_x = 0,93$  при  $\bar{x} = 0$  (см. рис. 3).

При проведении численных расчетов установлено, что высота стакана  $h_0 = 30,4$  мм, полученного из заготовки постоянной толщины, меньше ее предварительной оценки, выполненной по рекомендациям справочной литературы и составляющей  $h_0 = 33$  мм. Это обусловлено доминированием утолщения металла над его утонением в процессе вытяжки, на что указывает характер распределения толщины в цилиндрической части вытянутого стакана (кривая 1 на рис. 3). Выявлено, что относительная высота стакана  $\bar{h} = h/h_0$  с уменьшением толщины края  $\bar{s}_1$  дисковой заготовки снижается, поскольку деформации заготовки по толщине при вытяжке с уменьшением  $\bar{s}_1$  увеличиваются (рис. 4). Эта информация имеет важное значение для правильного выбора радиуса  $R_0$  заготовки, а также для назначения рационального припуска на подрезку торца детали после вытяжки.

Важное прикладное значение заготовок переменной толщины состоит в том, что их применение позволяет существенно повысить значение предельного коэффициента вытяжки  $k_0$  и сократить число вытяжных операций при изготовлении длинномерных деталей. В частности, для заготовок с линейным утонением (1) в случае  $\bar{s}_1 = 0$  предельный коэффициент вытяжки достигает максимального значе-

ния, которое составляет  $k_0 = 4,92$ , что в 1,81 раза больше теоретического значения предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок постоянной толщины, равного  $k_0 = 2,72$  (кривая 1 на рис. 2).



**Рис. 4.** Зависимость относительной высоты  $\bar{h}$  цилиндрической части стакана от толщины  $\bar{s}_1$  края дисковой заготовки

Для установления закона распределения толщины дисковой заготовки, обеспечивающего наибольшее значение предельного коэффициента вытяжки, исследовано влияние знака кривизны образующей фланца на деформационную способность металла. Показано, что из трех видов образующих — вогнутой, прямолинейной и выпуклой — лучшие результаты обеспечиваются образующей вогнутой формы. Установлено, что наибольшие значения предельного коэффициента вытяжки для образующей вогнутой формы достигаются при параболическом и логарифмическом законах изменения толщины  $s$  заготовки в зависимости от ее радиуса  $r$ :

$$\bar{s}(\bar{r}) = (1 - \bar{s}_1) \left( \frac{k - \bar{r}}{k - 1} \right)^2 + \bar{s}_1, \quad (4)$$

$$\bar{s}(\bar{r}) = (\bar{s}_1 - 1) \frac{\ln \bar{r}}{\ln k} + 1.$$

Области определения безразмерных величин, представленных в формулах (1) и (4), одинаковые.

Используя подход, аналогичный применявшемуся при выводе зависимости (3), можно показать, что при законах (4) изменения толщины заготовки зависимости, связывающие величины  $k_0$  и  $\bar{s}_1$ , будут иметь следующий вид:

$$\bar{s}_1 = \frac{2,5k_0^2 - 4k_0 + 1,5 - k_0^2 \ln k_0}{1,5k_0^2 - 2k_0 + 0,5 - (2k_0 - 1) \ln k_0}, \quad (5)$$

$$k_0 = \exp\left(\frac{2}{\bar{s}_1 + 1}\right).$$

Анализ соотношений (5), а также их графических представлений (кривые 2 и 3 на рис. 2) показывает: для параболического и логарифмического законов (4) изменения толщины дисковой заготовки значения предельного коэффициента вытяжки (при  $\bar{s}_1 = 0$ ) выше, чем для линейного закона (1), и составляют соответственно  $k_0 = 7,18$  и  $k_0 = e^2 \approx 7,39$ .

Следует отметить, что повышение значения предельного коэффициента вытяжки на основе профилирования листовых заготовок по толщине в соответствии с законами (4) будет сопровождаться увеличением разнотолщинности вытягиваемых стаканов. Ее можно уменьшить, включив в технологический процесс изготовления деталей в качестве заключительной операции вытяжку с принудительным утонением. Однако это приведет не только к усложнению технологического процесса штамповки, но и к превышению толщины донной части детали над толщиной ее цилиндрической стенки. С учетом этой особенности профилированных по законам (4) листовых заготовок можно рекомендовать их применение для штамповки оболочечных деталей свинцом, поскольку торцовый подпор заготовки пластичным металлом при вытяжке способствует уменьшению разнотолщинности деталей и позволяет в ряде случаев отказаться от последующей вытяжки с принудительным утонением [18].

Важное значение для практического применения заготовок переменной толщины, удовлетворяющей законам (1), (3), имеют технологии профилирования заготовок по толщине. Несмотря на то что профилированные по толщине заготовки рекомендуются к применению для изготовления деталей, например, ротационной вытяжкой [19], глубокой вытяжкой в инструментальных штампах [16, 20], при производстве таких заготовок могут возникать технологические проблемы. Например, профилирование наиболее производительным и универсальным методом — механической обработкой — затруднительно в случае использования относительно тонких заготовок, для которых  $s_0/R_0 < 0,02$ . Это связано с тем, что при подрезке плоскости тонкостенного диска для изменения его толщины на токарном станке с ЧПУ требуется синхронизировать продольную и поперечную подачи режущего инструмента, различающиеся в 50 раз и более. Например, при продольной подаче 0,1 мм/об требуется обеспечить поперечную

подачу 0,002 мм/об, что меньше дискретности поперечной подачи универсального токарного станка с ЧПУ 12К20Ф3, равной 0,005 мм.

Разработана технология механической обработки на токарных станках профилированных по толщине листовых заготовок, не требующая синхронизации продольной и поперечной подач инструмента [21]. Суть технологии продемонстрирована на рис. 5. Предварительно изготовленную оправку 1, полость которой является негативным отображением профиля заготовки переменной толщины, устанавливают на шпиндель токарного станка. Дисковую заготовку 2 постоянной толщины базируют по внутренней цилиндрической поверхности оправки и закрепляют в ней силой давления центра с плоским торцом 3, установленного в пиноли задней бабки. Под действием силы закрепления заготовка деформируется и заполняет полость оправки. Подрезка торца заготовки, при которой формируется распределение ее толщины в радиальном направлении, осуществляется при поперечном движении режущего инструмента 4.

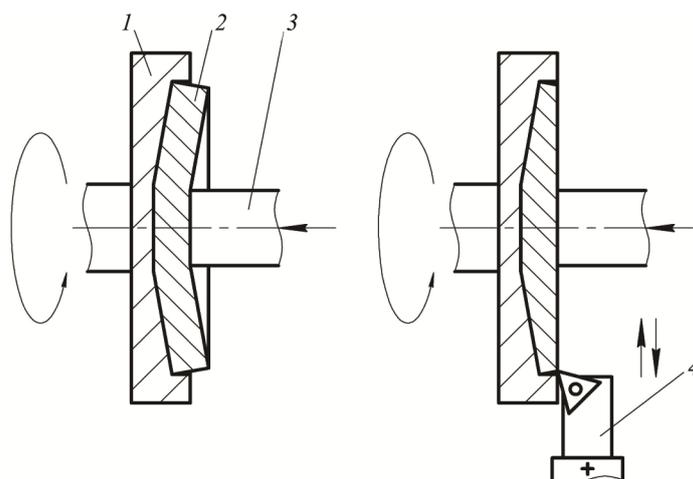


Рис. 5. Схема получения дисковой заготовки переменной толщины:

1 — профилированная оправка; 2 — деформированная заготовка постоянной толщины; 3 — центр с плоским торцом; 4 — подрезной резец

Достоинствами этой технологии являются простота и высокая производительность ее реализации на станках как с ручным управлением, так и с ЧПУ.

Проведенные исследования позволили разработать, изготовить и применить на практике листовые заготовки переменной толщины для вытяжки деталей, к которым предъявляются жесткие требования по толщине и массе. В частности, были изготовлены днища баков сферической и торовой форм, используемые в ракетно-космической технике, а также элементы конструкций подшипников скольжения

вертолетов и самолетов. Кроме того, заготовки переменной толщины использовались в технологических процессах изготовления бронированных шлемов и облицовок кумулятивных зарядов. Во всех перечисленных изделиях обеспечены снижение массы (кроме кумулятивных облицовок, которые требовалось изготовить дигрессивной толщины в направлении от центра к краю), повышение эксплуатационных характеристик, а также улучшение технико-экономических показателей их производства.

### **Выводы**

1. Разработаны зависимости, которые могут быть использованы при проектировании дисковых листовых заготовок переменной толщины, обеспечивающих изготовление деталей цилиндрической формы с уменьшенной разнотолщинностью методом вытяжки в инструментальном штампе. Численным моделированием процесса вытяжки показано, что применение таких заготовок обеспечивает уменьшение разнотолщинности деталей более чем в 3 раза, а также позволяет получать детали с дигрессивным изменением толщины.

2. Для повышения значения предельного коэффициента вытяжки предложено использовать дисковые листовые заготовки переменной толщины, изменяющейся по нелинейному закону. Показано, что применение заготовок с логарифмическим законом утонения в направлении от центральной части к их краю позволяет повысить максимально возможное, теоретическое значение предельного коэффициента вытяжки в 2,72 раза.

3. Предложен способ получения дисковых листовых заготовок переменной толщины с помощью механической обработки, не требующий синхронизации продольной и поперечной подачи режущего инструмента.

4. Комплексное применение разработанных рекомендаций по проектированию конструкции и технологии изготовления дисковых заготовок переменной толщины позволило изготовить опытные и серийные образцы ответственных деталей с уменьшенной разнотолщинностью для летательных аппаратов и изделий специальной техники.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Чумадин А.С., Смыков А.Ф., Петров А.П., Шемонаева Е.С. Эффективный способ изготовления равнотолщинных днищ. *Технология металлов*, 2018, № 3, с. 18–22.
- [2] Семенов И.Е., Евсюков С.А. Формовка тонкостенных элементов плоских теплообменников. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2017, вып. 11, ч. 1, с. 34–40.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Шемонаева Е.С. Расчеты процессов формовки крутоизогнутых патрубков. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 2, с. 32–37.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Чумадин А.С., Ершов В.И., Шемонаева Е.С. Исследование процесса формовки полуторов из листовых заготовок. *Авиационная промышленность*, 2013, № 2, с. 33.
- [10] 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.
- [11] Ковалевич М.В. Отработка деталей на технологичность при пневмотермической формовке. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2015, № 2, с. 23–26.
- [12] 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, вып. 11, ч. 2, с. 235–251.
- [13] Бабури́н 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.
- [14] 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.
- [15] Бабури́н 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.
- [16] Сизов Е.С. (СССР). *Заготовка для глубокой вытяжки*. А. с. 733796 СССР, опубл. 10.09.80, бюл. № 18, 3 с.
- [17] Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Баскаков В.Д., Бабури́н М.А., Курепин А.Е., Горбунков А.А., Пирозерский А.С. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера — цилиндр дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 122–125.
- [18] Бабури́н 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.
- [19] Могильный Н.И. *Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках*. Москва, Машиностроение, 1983, 192 с.
- [20] Сизов Е.С., Бабурин М.А., Сизова К.Г., Алавердов В.Р., Ротницкий Г.С. (СССР). *Заготовка для глубокой вытяжки*. А. с. 958010 СССР, опубл. 15.09.82, бюл. № 34, 2 с.
- [21] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Васильева Т.В. *Способ изготовления листовых профилированных по толщине заготовок для глубокой вытяжки*. Пат. № 2595307 Российская Федерация, 2016, бюл. № 24, 2 с.

Статья поступила в редакцию 09.04.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Особенности проектирования и изготовления листовых заготовок переменной толщины для вытяжки деталей летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1774>

**Бабурин Михаил Аронович** — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: производство летательных аппаратов. e-mail: babma@mail.ru

**Баскаков Владимир Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: производство летательных аппаратов. e-mail: baskakov\_vd@mail.ru

**Зарубина Ольга Васильевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: производство летательных аппаратов. e-mail: ov\_zarubina@mail.ru

**Тарасов Владимир Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: технология машиностроения, контроль и диагностика. e-mail: tarasov\_va@mail.ru

## **Design and production specifics of variable-thickness sheet metal workpieces for aircraft part drawing**

© M.A. Baburin, V.D. Baskakov, O.V. Zarubina, V.A. Tarasov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents guidelines for designing and manufacturing variable-thickness disk-shaped workpieces made of sheet metal that ensure more uniform thickness of drawn parts. The novelty of our investigation results lies in describing variations in wall thickness and height of cylindrical parts as functions of geometrical parameters of these disk-shaped workpieces, the thickness of which decreases towards the edge. Our study simulated the drawing process numerically using the DEFORM software package. We determined the limiting drawing ratio by solving the differential equation of equilibrium for the flange of a variable-thickness disk-shaped workpiece. We established that workpieces characterised by a linear thickness variation function make it possible to compensate for increases in flange thickness during drawing of parts, making the resulting part thickness more than 3 times more uniform. We show that disk-shaped workpieces characterised by a linear thickness variation function enable manufacturing of parts featuring walls that have both constant and decreasing thickness. In order to reduce the number of drawing operations we suggest using disk-shaped workpieces characterised by linear, parabolic and logarithmic thickness variation functions. We recommend manufacturing variable-thickness disk-shaped workpieces by machining them pre-strained.*

**Keywords:** *disk-shaped workpiece, limiting drawing ratio, non-uniform thickness, work-piece edge thickness, thickness variation function*

### REFERENCES

- [1] Chumadin A.S., Smykov A.F., Petrov A.P., Shemonaeva E.S. *Tekhnologiya metallov (Metal Engineering)*, 2018, no. 3, pp. 18–22.
- [2] Semenov I.E., Evsyukov S.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Proceedings of the TSU. Technical sciences*, 2017, no. 11, part. 1, pp. 34–40.
- [3] Shemonaeva E.S., Goncharov A.V. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2017, no. 2, pp. 11–16.
- [4] Melnikov E.L., Serezhkin M.A., Stupnikov V.V., Bodareva A.V., Avanesyan V.P. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya — Repair, Reconditioning, Modernization*, 2016, no. 12, pp. 28–33.
- [5] Kovalevich M.V., Goncharov A.V., Gukov R.Yu. “*Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*” *Journal (Bulletin of Moscow Aviation Institute)*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 136–142.
- [6] Shemonaeva E.S. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2015, no. 2, pp. 32–37.
- [7] Kuznetsov A.F., Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2017, no. 3, pp. 19–23.
- [8] Kulakov V.G., Moiseev V.K., Sharov A.A., Lomovskoy O.V., Plotnikov A.N. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 6 (4), pp. 855–860.

- [9] Chumadin A.S., Ershov V.I., Shemonaeva E.S. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 2013, no. 2, pp. 33.
- [10] Volkhonskiy A.E., Kovalevich M.V., Goncharov A.V. *Obrazovatelnye tekhnologii (Educational Technologies)*, 2014, no. 4, pp. 120–128.
- [11] Kovalevich M.V. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2015, no. 2, pp. 23–26.
- [12] Larin S.N., Nuzhdin G.A., Pasyнков A.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Proceedings of the TSU. Technical sciences*, 2016, no. 11, vol. 2, pp. 235–251.
- [13] Baburin M.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A., Zarubina O.V. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2015, no. 1, pp. 3–6.
- [14] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2015, no. 7, pp. 16–22.
- [15] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. *Tekhnologiya metallov (Metal Engineering)*, 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [16] Sizov E.S. (USSR). *Zagotovka dlya glubokoy vytyazhki* [Workpiece for deep drawing]. Inventor's certificate 733796 USSR, publ. September 10th, 1980, bul. no. 18, 3 p.
- [17] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Baskakov V.D., Baburin M.A., Kurepin A.E., Gorbunkov A.A., Pirozerskiy A.S. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 122–125.
- [18] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2014, no. 7, pp. 21–24.
- [19] Mogilnyy N.I. *Rotatsionnaya vytyazhka obolochkovykh detaley na stankakh* [Spin forming of shells using lathes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 192 p.
- [20] Sizov E.S., Baburin M.A., Sizova K.G., Alaverdov V.R., Rotnitskiy G.S. (USSR). *Zagotovka dlya glubokoy vytyazhki* [Workpiece for deep drawing]. Inventor's certificate 958010 USSR, publ. September 15th, 1982, bul. no. 34, 2 p.
- [21] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Vasileva T.V. *Sposob izgotovleniya listovykh profilirovannykh po tolshchine zagotovok dlya glubokoy vytyazhki* [Manufacturing technique for thickness-profiled sheet metal workpieces for deep drawing]. Patent RU2595307, 2016, bul. no. 24, 2 p.

**Baburin M.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assistant, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in aircraft production. e-mail: babma@mail.ru

**Baskakov V.D.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in aircraft production. e-mail: baskakov\_vd@mail.ru

**Zarubina O.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in aircraft production. e-mail: ov\_zarubina@mail.ru

**Tarasov V.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in mechanical engineering technology, control and diagnostics. e-mail: tarasov\_va@mail.ru