

УДК 621.983

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ ОБКАТКИ

В. В. ЛЕОНТЬЕВ<sup>1</sup>, М. С. САЛИНА<sup>2</sup>, Ю. П. КАТАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>leontev\_viktor@mail.ru, <sup>2</sup>2707fm@mail.ru, <sup>3</sup>tmp-tpd@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ»

*Поступила в редакцию 24.12.2018*

**Аннотация.** Рассматриваются процессы формообразования полых деталей летательных аппаратов методом обкатки. При этом анализируется общий случай, когда деформация по толщине заготовки в процессе формообразования, обусловленная сжатием фланцевой части, может иметь заданные значения. Эти значения могут определяться из условия постоянства толщины детали, равной исходной толщине листа, или может допускаться увеличение толщины до значения относительных деформаций, равных 0,5 от величины деформаций сжатия на фланце. Определяются напряжения, деформации, необходимые усилия для осуществления процесса. Корректируется также геометрическая форма листовой заготовки исходя из геометрии формуемой полых детали с переменной кривизной контура поперечного сечения при этих условиях.

**Ключевые слова:** листовой металл; полая деталь; способ обкатки; технологические пластины; напряжения; обобщенное напряжение, деформации; обобщенная деформация; степенная зависимость; усилие деформирования.

### ВВЕДЕНИЕ

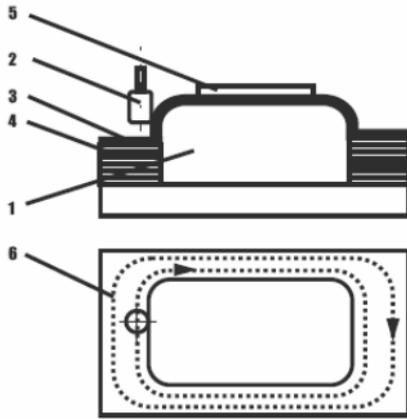
Летательные аппараты при заданной прочности конструкции должны обладать минимальным весом. Решение этого вопроса осуществляется использованием в конструкции материалов, обладающих наибольшим коэффициентом удельной прочности, представляющим отношение предела текучести материала к его удельному весу, а также созданием таких конструктивных решений, при которых материал конструкции работает при максимально допустимых напряжениях. Последнее условие приводит к тому, что материал в конструкции детали целесообразно разносить от ее центральных осей. Данное утверждение справедливо также для узлов и агрегатов. Это приводит к тому, что конструкции летательных аппаратов состоят из профилей, слоистых конструкций с легким наполнителем полых деталей.

Полые детали изготавливаются из листового металла различными способами: обтяжкой, гибкой, формованием, штамповкой, вытяжкой, ротационным деформированием [1, 2].

Ротационное формообразование является эффективным технологическим процессом. Однако этим способом получают осесимметричные детали. Получение полых деталей со сложным поперечным сечением представляет большие трудности.

### ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ОБКАТКИ

В работе предлагается способ формообразования полых деталей методом обкатки, когда обкатной ролик обходит неподвижную оправку с закрепленной на ней листовой заготовкой, прижимая листовую заготовку к оправке (рис. 1) [3–5].



**Рис. 1.** Схема получения полых деталей методом обкатки: 1 – оправка; 2 – обкатная головка; 3 – заготовка; 4 – технологические пластины; 5 – прижим; 6 – траектория движения обкатной головки

При этом листовая заготовка опирается на пакет технологических пластин. Они позволяют в завершающей стадии обкатки участка заготовки расправить гофры, возникающие на фланце заготовки. После этого производится удаление очередной технологической пластины и выполняется обкатка следующего участка полых деталей. Поочередно удаляя технологические пластины, с помощью которых расправляются гофры, возникающие на фланце, можно получить более глубокие полые детали.

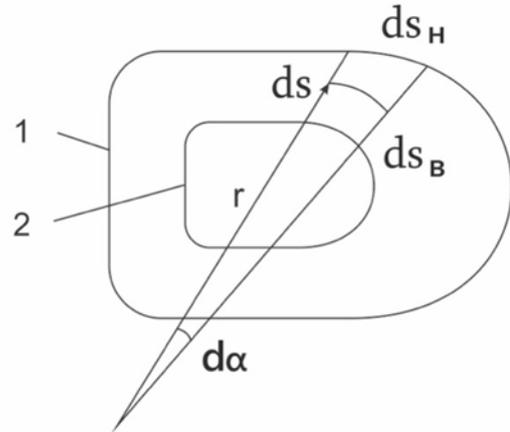
Геометрическая форма оправки соответствует геометрии изготавливаемой детали, имеющей произвольную форму поперечных сечений. Перемещение ролика по контуру поперечного сечения производится по заданной программе на станке с ЧПУ. Исходная листовая заготовка для полых детали с произвольным поперечным сечением приведена на рис. 2. Параметр  $r$  представляет радиус кривизны произвольной дуги  $ds$ , расположенной эквидистантно дуге  $ds_в$  донной части.

Рассмотрим напряженно деформированное состояние заготовки в процессе формообразования.

Для этого рассмотрим уравнение равновесия дифференциально-малого элемента плоской заготовки при формообразовании (рис. 3). Полагаем, что касательные напряжения, которые могут возникнуть на гранях этого элемента, малы по величине:

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr\right)(r + dr)d\alpha - \sigma_r r d\alpha - (\sigma_s + d\sigma_s)dr \frac{d\alpha}{2} - \sigma_s dr \frac{d\alpha}{2} = 0,$$

где  $r$  – радиус кривизны произвольной дуги заготовки.



**Рис. 2.** Геометрическая форма листовой заготовки для формообразования полых деталей: 1 – наружный контур заготовки; 2 – геометрическая форма донной части детали

После преобразования имеем:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_s}{r} = 0. \quad (1)$$

Запишем условие равенства направляющего тензора напряжений направляющему тензору деформаций:

$$\sigma_r - \sigma_{cp} = \frac{\sigma_i}{(1 + \mu)\epsilon_i} (\epsilon_r - \epsilon_{cp}),$$

$$\sigma_s - \sigma_{cp} = \frac{\sigma_i}{(1 + \mu)\epsilon_i} (\epsilon_s - \epsilon_{cp}),$$

$$\sigma_z - \sigma_{cp} = \frac{\sigma_i}{(1 + \mu)\epsilon_i} (\epsilon_z - \epsilon_{cp}),$$

где

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_r + \sigma_s + \sigma_z}{3},$$

$$\epsilon_{cp} = \frac{\epsilon_r + \epsilon_s + \epsilon_z}{3}, \quad (2)$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_s)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}$$

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_s)^2 + (\epsilon_s - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_r)^2}$$

$\sigma_i$  – обобщенное напряжение;  $\varepsilon_i$  – обобщенная деформация;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

При условии несжимаемости

$$\varepsilon_r + \varepsilon_s + \varepsilon_z = 0. \quad (3)$$

Если  $\varepsilon_z = 0$ , то получаем  $\varepsilon_r = -\varepsilon_s$ . Учитывая, что деформация  $\varepsilon_z$  определяется расстоянием между оправкой и поверхностью ролика, то в общем случае можно записать:

$$\varepsilon_z = -i\varepsilon_s, \quad (4)$$

где  $i = 0 \div 0,5$ .

При условии (4) из уравнения несжимаемости (3) находим:

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_s(1-i). \quad (5)$$

Из совместного рассмотрения соотношений (2–5) при этом условии получим:

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_{cp} &= -\frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}(1-i)\varepsilon_s, \\ \sigma_s - \sigma_{cp} &= \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}\varepsilon_s, \quad \sigma_z - \sigma_{cp} = -\frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}i\varepsilon_z. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом (4) и (5) запишем величину обобщенной деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= a\varepsilon_s, \\ a &= \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{1+i^2-i}. \end{aligned} \quad (7)$$

При степенной зависимости между обобщенным напряжением  $\sigma_i$  и обобщенной деформацией  $\varepsilon_i$  получим:

$$\sigma_i = Ka^n \varepsilon_s^n. \quad (8)$$

Константы  $K$  и  $n$  в выражении (8) определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} n &= \frac{\ln \frac{\sigma_B}{\sigma_T}}{\ln \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_T}}, \\ K &= \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^n}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\sigma_B, \sigma_T, \varepsilon_B, \varepsilon_T$  – соответственно временное сопротивление и предел текучести металла по напряжению и по деформации.

Из совместного решения (6–8) получим:

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_s &= -\frac{2K}{3a^{1-n}}(2-i)\varepsilon_s^n \\ \sigma_z - \sigma_r &= \frac{2K}{3a^{1-n}}(1-2i)\varepsilon_s^n. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{2K}{3a^{1-n}}(2-i)\frac{\varepsilon_s^n}{r}. \quad (11)$$

Деформация  $\varepsilon_s$  зависит от перемещения  $u$  ролика по образующей:

$$\varepsilon_s = -\frac{u}{r}. \quad (12)$$

Из совместного решения (11) и (12) получим:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = -\frac{2K}{3a^{1-n}}(2-i)\frac{u^n}{r^{n+1}}. \quad (13)$$

После интегрирования из выражения (13) имеем:

$$\sigma_r = \frac{2K}{3a^{1-n}}\frac{(2-i)u^n}{nr^n} + c. \quad (14)$$

Константу интегрирования  $c$  определим из граничного условия:

при  $r = r_n$   $\sigma_r = 0$ :

$$c = -\frac{2K}{3a^{1-n}}\frac{(2-i)u^n}{nr_n^n}. \quad (15)$$

Подставляя значение константы  $c$  в уравнение (14) окончательно получаем:

$$\sigma_r = \frac{2K}{3a^{1-n}}\frac{(2-i)u^n}{n}\left(\frac{1}{r^n} - \frac{1}{r_n^n}\right). \quad (16)$$

Исходя из уравнения (10), с учетом соотношения (16), запишем значение напряжения  $\sigma_z$  при давлении ролика на заготовку и напряжения  $\sigma_s$  по контуру заготовки:

$$\sigma_z = \frac{2K}{3a^{1-n}} \frac{u^n}{n} \left[ (2-i) \left( \frac{1}{r^n} - \frac{1}{r_n^n} \right) - \frac{(1-2i)n}{r^n} \right],$$

$$\sigma_s = -\frac{2K}{3a^{1-n}} \frac{u^n(2-i)}{n} \left( \frac{1}{r_n^n} - \frac{1-n}{r^n} \right). \quad (17)$$

Наряду с напряжением  $\sigma_r$ , обусловленным движением ролика параллельно оси оправки, происходит изгиб с последующим разгибанием рассматриваемого элемента заготовки. Исходя из энергии изгиба и равной энергии разгибания, определится радиальное напряжение, обусловленное этой деформацией:

$$\sigma_r^* = \frac{K\delta^{n+1}}{2^{n+2}(n+1)(n+2)(r_p + 0,5\delta)^{n+1}}, \quad (18)$$

где  $\delta$  – толщина заготовки;  $r_p$  – радиус закругления деформирующего ролика.

Силы трения между роликом и листовой заготовкой создают дополнительное напряжение:

$$\sigma_r^{**} = \sigma_r \left( e^{f \frac{\pi}{2}} - 1 \right). \quad (19)$$

Усилие, необходимое для перемещения ролика, будет:

$$P_0 = (\sigma_r + \sigma_r^* + \sigma_r^{**}) l_k r_p, \quad (20)$$

где  $l_k$  – длина контакта ролика с заготовкой по дуге  $s$ .

Усилие оказывается переменным по длине дуги контура и по оси оправки.

Перемещение  $u$  по радиусу заготовки наружного контура будет:

$$u_n = \frac{\varepsilon_n r_n}{1-i}. \quad (21)$$

На эту величину должна быть уменьшена длина образующей заготовки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ обкатки является эффективной разновидностью ротационного формообразования. Он позволяет получать глубокие полые неосесимметричные детали, так как в процессе обкатки выполняется разглаживание гофр (рис. 3–5).

Усилия, которые необходимо прикладывать к ролику в осевом направлении детали, определяются исходя из соотношения (20) величиной  $P_0$ . Эта величина определяется напряжением, обусловленным складываем фланца, напряжением  $\sigma_r^*$ , определяемым перегибом заготовки на обкатном ролике, и напряжением  $\sigma_r^{**}$ , зависящим от коэффициента трения между обкатным роликом и заготовкой. Эти напряжения определяются соответственно соотношениями (14–19).

Усилие на сжатие ролика на оправку с заготовкой определяются напряжением, вычисляемым по формуле (17), и площадью контакта ролика с заготовкой.

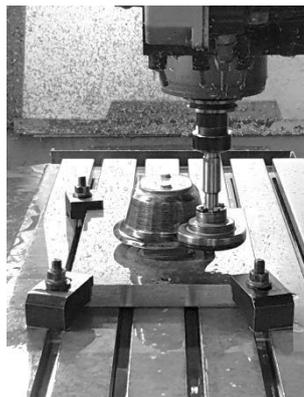
Если контур поперечного сечения полый детали имеет переменную кривизну, то напряженно-деформированное состояние заготовки и усилия формообразования являются переменными по дуге контура поперечного сечения.



Рис. 3. Процесс формообразования полый неосесимметричной детали способом обкатки



Рис. 4. Заключительная стадия формообразования полый неосесимметричной детали методом обкатки



**Рис. 5.** Формообразование полых конической детали способом обкатки

Эти параметры являются также переменными по величине отформованного участка заготовки.

Наружный контур исходной заготовки представляет линию, которая не является эквидистантной линии контура донной части полых детали.

Корректировка наружного контура определяется параметром  $u_n$ , вычисляемым по формуле (21).

Предложенная технология процесса формообразования полых деталей летательных аппаратов методом обкатки является эффективной в условиях единичного и мелкосерийного производства без использования специализированного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев Ю. П. Напряженное состояние при глубокой вытяжке металлов // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2012. № 4. Вып. 2. С. 61–64. [ Yu. P. Kataev, "Stress state during deep drawing of metals", (in Russian), in *Vestnik KGTU after A. N. Tupolev*, vol. 4, no. 2, pp. 61-64, 2012. ]
2. Леонтьев В. В., Катаев Ю. П. Изготовление полых деталей с прямоугольным поперечным сечением из листового металла локальным формообразованием // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2017. № 4. С. 67–70. [ V. V. Leontyev, Yu. P. Kataev, "Manufacture of hollow parts with rectangular cross section of sheet metal local shaping", (in Russian), in *Vestnik KGTU after A. N. Tupolev*, no. 4, pp. 67-70, 2017. ]
3. Леонтьев В. В., Катаев Ю. П., Лизунов А. А. Обкатная головка. Патент на изобретение № 2632747. 18.10.2016. Бюл. № 28. [ V. V. Leontyev, Yu. P. Kataev, A. A. Lizunov, "Rolling head", Patent № 2632747, 2016. ]
4. Леонтьев В. В., Катаев Ю. П., Лизунов А. А. Способ вытяжки тонкостенных изделий сложной формы. Патент на изобретение № 2620219. 02.02.2016.-Бюл. № 15. [ V. V. Leontyev, Yu. P. Kataev, A. A. Lizunov, "The method of drawing thin-walled products of complex shape", Patent № 2620219, 2016. ]
5. Способ вытяжки полых цилиндрических изделий и вытяжной станок для их изготовления / В. В. Леонтьев и

др. // Патент на изобретение № 2639202. 20.12. 2017. [ V. V. Leontyev et. al., "The method of drawing hollow cylindrical products and exhaust machine for their manufacture", Patent № 2639202, 2017. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЛЕОНТЬЕВ Виктор Васильевич**, асп. каф. ТМП. Дипл. инженера-механика (КАИ, 1989). Готовит дис. по исследованию процессов изготовления полых деталей летательных аппаратов методами обкатки.

**САЛИНА Марина Сергеевна**, ст. преп. каф. ТМП. Дипл. магистра техники и технологии (КНИТУ, 2012). Канд. техн. наук по проектированию, конструкции и производству летательных аппаратов (Самарск. ун-т, 2016). Иссл. в обл. изготовления деталей летательных аппаратов.

**КАТАЕВ Юрий Павлович**, проф. каф. ТМП. Дипл. инженера (Казанск. авиац. ин-т, 1960). Д-р техн. наук (КАИ, 1971). Иссл. в обл. изготовления деталей летательных аппаратов.

#### METADATA

**Title:** Data computation of shaping process of hollow details aircraft by a rolling method.

**Authors:** V. V. Leontyev<sup>1</sup>, M. S. Salina<sup>2</sup>, Yu. P. Kataev<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI (KNRTU–KAI), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>leontev\_viktor@mail.ru, <sup>2</sup>2707fm@mail.ru, <sup>3</sup>ttmp-tpd@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 19-23, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Processes of shaping of hollow details of aircraft are considered by a rolling method. At the same time three ways of rolling are allocated: rolling with use of technological plates, with use of technological cylinders, with use of technological cones. Constructive schemes of deforming rollers are considered. Tension, deformations, necessary efforts for process exercise is defined. Also geometrical form of sheet preparation, proceeding from geometry of the formed hollow detail with variable curvature of a contour of a transverse section is adjusted. The operability of constructive schemes of processes of rolling is experimentally approved at manufacture of hollow details.

**Key words:** sheet metal, hollow detail, tension, deformations, deformation effort, technological plate; technological cylinder; technological cone; blooming roller; polyurethane.

**About authors:**

**LEONTYEV, Viktor Vasil'evich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Machine-building Technologies. mechanical engineer (KAI, 1989).

**SALINA, Marina Sergeevna**, Senior lecturer, Dept. of Machine-building Technologies. Master of Technics & Technology (Kazan National Research Technol. Univ., 2012). Candidate. of Tech. Sci. (Samara National Research University, 2016).

**KATAEV, Yuriy Pavlovich**, Prof., Dept. of Machine-building Technologies. Dipl. Engineer (KAI, 1960). Dr. of Tech. Sci. (KAI, 1971).