

## ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ДЕТАЛИ ТИПА «ФОРСУНКА» ДВИГАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С. Ю. Звонов, И. П. Попов, В. А. Михеев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Описан процесс формообразования (вытяжка с принудительным утонением) детали типа «форсунка» двигателя летательного аппарата. Исследовано напряжённо-деформированное состояние и изменение толщины вдоль образующей заготовки в ходе процесса. Представлены результаты научно-исследовательских работ, выполненных в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

*Вытяжка, утонение, толщина, стадия, формирование, конус, сечение, коэффициент.*

При обработке металлов давлением возникают сложности получения штампованной детали, размеры которой либо близки, либо полностью соответствуют готовому изделию. Решение этой сложности позволит снизить себестоимость готового изделия за счёт повышения коэффициента использования материала, снижения трудозатрат, а главное – повысить эксплуатационные характеристики изделия, что чрезвычайно важно в производстве деталей двигателей летательных аппаратов [1].

В конструкции двигателей летательных аппаратов широко используются небольшие по размерам детали типа «форсунка» камеры сгорания (рис. 1).

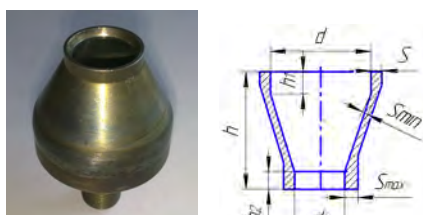


Рис. 1. Фотография и геометрические характеристики детали типа «форсунка»:

$d, S$  – внутренний диаметр большого торца и его толщина;

$d1, S_{max}$  – внутренний диаметр малого торца и его толщина;

$S_{min}$  – толщина стенки детали;

$h$  – высота детали;

$h1$  и  $h2$  – высоты цилиндрических участков

Особенностью геометрии подобных деталей является наличие разной толщи-

ны вдоль образующей, причём наибольшие значения принадлежат цилиндрическим участкам, а наименьшие – конической стенке. Подобные детали изготавливаются из никелевых сплавов, обладающих достаточно высокой пластичностью и жаропрочностью.

В настоящее время получение подобных деталей основано на технологии, включающей процессы вытяжки цилиндрического стакана, последующего его обжима и окончательной механической обработки [1]. Однако такая технология не дает возможности получать деталь типа «форсунка» с утолщениями на кромках большого и меньшего диаметров. Для совершенствования существующей технологии, с возможностью получать утолщения на кромках детали, предлагается использовать процесс вытяжки с принудительным утонением цилиндрического стакана. Принудительное утонение осуществляется на участке, который при обжиге формирует коническую стенку и утолщённую цилиндрическую часть большого диаметра форсунки.

Поэтому согласуем размеры детали после обжима с полуфабрикатом, который получим после вытяжки с принудительным утонением, применяя результаты процесса обжима цилиндрического стакана с отверстием в дне [2,3]:

- Очаг пластической деформации

при обжиге считаем плоско - деформированным. Выполняется условие

$$\epsilon_p = -\epsilon_s,$$

где

$\epsilon_p$  – деформация в широтном направлении;  
 $\epsilon_s$  – деформация по толщине.

Следовательно, когда условие постоянства объёма выполняется, деформация в меридиональном направлении равна нулю ( $\epsilon_p=0$ ), т.е. длина образующей при обжиге в очаге пластической деформации не изменяется.

- Элементы заготовки в зоне большого и малого диаметров полуфабриката деформируются при обжиге без изменения размеров диаметров и толщин.

На рисунке 2 представлены согласованные размеры полуфабриката, полученного вытяжкой с принудительным утонением (с пробивкой отверстия в дне заготовки), и конической детали, полученной после обжига. Размеры полуфабриката позволяют рассчитать размеры исходной плоской круглой заготовки. Толщину исходной заготовки определяем в соответствии с формулой

$$S_{заг} = S_{max} + \Delta, \quad (1)$$

где

$S_{заг}$  – размеры исходной плоской круглой заготовки;

$\Delta$  – двухсторонний припуск на механическую обработку;

$S_{max}$  – толщина цилиндрической части меньшего диаметра конической детали.

Диаметр круглой заготовки определяем из условия постоянства объёма с учётом припуска на механическую обработку.

Следует отметить, что набор толщины, который имеет место в очаге пластической деформации при обжиге (в центральной части стенки конической детали) является дополнительным припуском под механическую обработку.

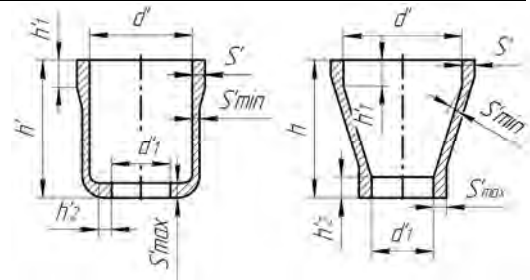


Рис. 2. Геометрические характеристики полуфабриката, полученного вытяжкой с принудительным утонением и конической детали после обжига:

$d', S'$  – внутренний диаметр большого торца и его толщина;

$d'1, S'max$  – внутренний диаметр малого торца и его толщина;

$S'min$  – толщина стенки детали;

$h'$  – высота детали;

$h'1$  – высота цилиндрического участка;

$h'2$  – высота цилиндрического участка

Важным является то обстоятельство, что при вытяжке в зоне радиусного перехода пуансона  $R_n$  утонение не должно превышать величины принудительного утонения стенки полуфабриката. Данный факт наиболее целесообразно установить с помощью моделирования процесса вытяжки с принудительным утонением, применяя программный комплекс DEFORM 2D для относительных толщин заготовок  $\frac{S_3}{D_3} \geq 0,02$  и коэффициентом вытяжки  $\frac{D_3}{d'} = 1,5, \dots, 1,6$ . Геометрическая модель заготовки и оснастки с учётом работы [3] имеют следующие размеры (рис. 3):

- углы конусности  $\alpha_1 = 20^\circ, \alpha_2 = 10^\circ$ ,
- диаметры  $D_m = 33,2$  мм,  $D_{m1} = 34$  мм,
- радиусы скругления матрицы  $R_{m1} = 2,5$  мм и  $R_{m2} = 10$  мм,
- диаметр пуансона  $D_n = 30$  мм,
- радиус скругления пуансона  $R_n = 4$  мм,
- диаметр заготовки  $D_3 = 50$  мм,
- толщина заготовки  $S_3 = 2,5$  мм,
- механические свойства материала заготовки соответствуют сплаву 12X18H10T.

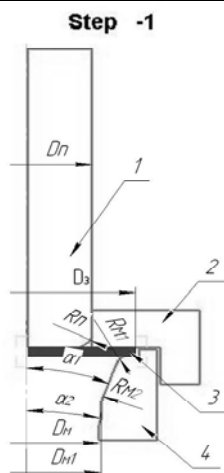


Рис. 3. Геометрическая модель для процесса вытяжки с принудительным утонением:

- 1 – пуансон;
- 2 – направляющая;
- 3 – заготовка;
- 4 – конусная матрица

На рисунках 4 и 5 представлены графики распределения толщин вдоль образующей по стадиям вытяжки с коэффициентом вытяжки  $K_B=1,55$ , с максимально возможным с точки зрения вытяжки и обжима заготовки коэффициентом утонения  $K_Y=1,6$  и коэффициентами трения  $\mu=0,05, \dots, 0,2$ .

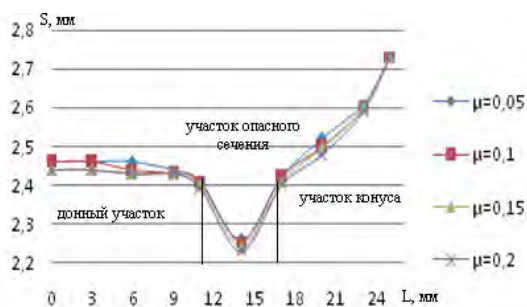


Рис. 4. График распределения толщин вдоль образующей конической чаши после первой стадии

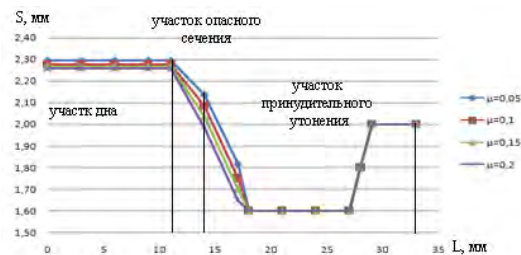


Рис. 5. График распределения толщин вдоль образующей цилиндрического стакана с принудительным утонением при разных коэффициентах трения после второй стадии

На рис. 6 видно, что максимальное значение усилия соответствует моменту входа кромки заготовки в зону принудительного утонения на второй стадии.

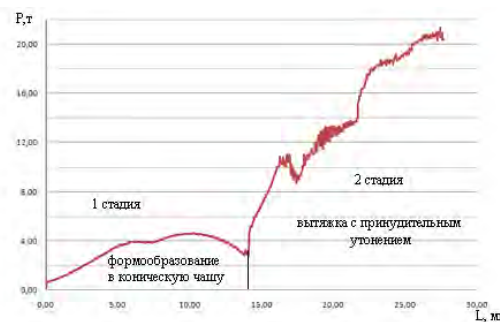


Рис. 6. Диаграмма изменения усилия при вытяжке в коническую матрицу с принудительным утонением

Из рисунков 4 и 5 видно, что в зоне опасного сечения (радиусного скругления пуансона  $R_n$ ) минимальное значение толщины имеет место после второй стадии вытяжки на длине образующей от 12 до 15 мм. Элементы в донной части заготовки утонились значительно меньше.

Полученные результаты моделирования приняты в основу расчёта процесса вытяжки с принудительным утонением цилиндрического стакана с относительными размерами  $\frac{S_3}{D_3} \geq 0,02$  и коэффициентом вытяжки, не превышающим  $K_B=1,55$  с минимальной толщиной на цилиндрическом участке стакана.

В первую очередь определим значения толщин элементов заготовки, находящихся в зоне кромки заготовки и входящих в очаг пластического деформиро-

вания с принудительным утонением. В основу расчёта положена инженерная методика [4, 5], включающая уравнение равновесия

$$\frac{d}{d} + \dots - \frac{\times}{\sin} \left( \frac{R}{R} + \frac{R}{R} \right) = 0, \quad (2)$$

где

- широтное напряжение;
- меридиональное напряжение;
- расстояние элемента от оси симметрии;
- угол между касательной к срединной поверхности заготовки;

$R$  – радиус кривизны срединной поверхности элемента в меридиональном направлении;

$R$  – радиус кривизны срединной поверхности элемента в широтном направлении.

Условие пластичности

$$\dots = \times s, \quad (3)$$

где – коэффициент Лодэ.

Уравнение связи

$$s = \times \left( \dots + 1 \right) / \left( \dots - 2 \right), \quad (4)$$

где

– напряжение по толщине.

Величина деформации в широтном направлении [5]

$$e = \frac{R_3 - R_k}{R_3}, \quad (5)$$

где

$R_3$  – радиус заготовки;

$R_k$  – радиус кромки заготовки.

Полученные значения параметров толщины кромки  $R_k = 17$  мм,  $S_{кр} = 2,7$  мм позволяют определить напряжение в протянутой цилиндрической части заготовки, когда кромка входит в очаг принудительного утонения. Основные расчёты производились согласно последовательности и схеме вытяжки одновременно с двумя зонами принудительного утонения в цилиндрических поясах матрицы (рис. 7), изложенной в работе [6].

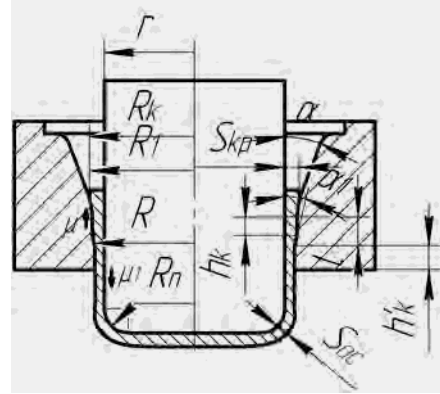


Рис. 7. Схема вытяжки одновременно с двумя зонами принудительного утонения в цилиндрических поясах матрицы с высотами  $h_k$

Определим осевое напряжение в протянутой части заготовки через зону принудительного утонения с цилиндрическим пояском высотой  $h_k$

$$c = 1,155 \times \left( 1 + \frac{-0,5}{\sin \dots} \right) \times \ln \left( \frac{R_k - r}{R_1 - r} + \frac{1 - \cos \dots}{\sin \dots} \right), \quad (6)$$

где

– коэффициент трения на матрице;

$\dots$  – коэффициент трения на пуансоне;

$R_n$  – радиус пуансона;

$R_1$  – радиус матрицы в зоне принудительного утонения с цилиндрическим пояском высотой  $h_k$ .

Осевое напряжение в протянутой части заготовки через зону принудительного утонения с цилиндрическим пояском высотой  $h'_k$ :

$$c_2 = c + 1,155 \left( \frac{1 - \cos \dots}{\sin \dots} - \frac{0,5}{\sin \dots} \right) \times \ln \left( \frac{R_1 - r}{R - r} - \frac{\times l - 2 \times h'_k}{R^2 - r^2} \right), \quad (7)$$

где

$R$  – радиус матрицы в зоне принудительного утонения с цилиндрическим пояском высотой  $h'_k$ ;

$l$  – расстояние между очагами пластического деформирования.

Полученные значения напряжений позволяют определить толщину в опасном сечении согласно рекомендациям, изложенным в работах [6, 7]:

$$S_{oc} = S_3 \times (1 - e_s), \quad (8)$$

где

$S_{oc}$  – толщина на участке опасного сечения;

$e_s$  – деформация по толщине на участке опасного сечения.

Деформация по толщине определяется по формуле

$$e_s = \frac{c_2 \times s^* - \sigma_{т0}}{\Pi}, \quad (9)$$

где

$\Pi$  – модуль упругости;

$s^*$  – средний предел текучести по очагу пластической деформации, определяемый по формуле

$$s^* = \frac{s_{ш} + s_{ск}}{2}, \quad (10)$$

где

$s_{ш}$  – напряжение текучести в зоне наименьшего принудительного утонения;

$s_{ск}$  – напряжение текучести в зоне наибольшего принудительного утонения.

$\sigma_{т0}$  – предел текучести, определяемый по формуле

$$\sigma_{т0} = \sigma_s \times e^{\Delta} (1 - \Delta), \quad (11)$$

где

$\Delta$  – относительное равномерное удлинение.

Значения толщин элементов заготовки в донной части найдём с учётом трения и изгиба заготовки по радиусу пуансона [6]. Для этого сначала определим меридиональное напряжение в донной части заготовки:

$$\sigma_{\max \text{ дна}} = \left( c_2 \times s^* - \frac{\sigma}{\frac{2R_n}{S_3} + 1} \right) / e^{\alpha_0}, \quad (12)$$

где

$\sigma$  – меридиональное напряжение в донной части заготовки;

$\alpha_0$  – угол обхвата заготовки радиусного скругления пуансона  $R_n$ .

По изложенной выше последовательности определяем деформацию по толщине и толщину на участке дна заготовки:

товки:

$$e_{SD} = \frac{\sigma_{SD} - \sigma_{т0}}{\Pi}, \quad S_{д} = S_s (1 - e_{SD}), \quad (13)$$

где  $e_{SD}$  – деформация по толщине участка дна заготовки;

$S_{д}$  – толщина участка дна заготовки.

Для рассматриваемого примера значения толщин в радиусной и донной части детали составляет

$\mu=0,05$ ,  $S_{oc} = 2,0$  мм;

$\mu=0,2$ ,  $S_{oc} = 2,14$  мм;

$\mu=0,05$ ,  $S_{д} = 2,25$  мм;

$\mu=0,2$ ,  $S_{д} = 2,29$  мм;

при  $\sigma_{т0} = 270$  МПа;

$\Pi = 4988$  МПа;  $\sigma_s = 550$  МПа.

Усилие процесса вытяжки определяем по известной формуле [5]

$$P_{\max} = \sigma_s \times ((R^2 - r^2) \times c_2 + 1,155 \times r \times \left( \frac{2 \times R_k - R_1 - R}{\sin} + l \right)). \quad (14)$$

Расчётное усилие составляет

$P_{\max} = 16,9$  т, при  $\mu=0,05$ ;

$P_{\max} = 31,7$  т, при  $\mu=0,2$ .

Расчитанные значения толщины, усилия хорошо сочетаются с результатами моделирования.

Проведенный анализ позволяет определить последовательность проектирования процесса формообразования детали типа «форсунка», основанного на операциях вытяжки с принудительным утонением и последующего обжима:

1. Определены размеры полуфабриката в виде цилиндрического стакана, полученного вытяжкой с принудительным утонением. В основе расчета используются размеры детали типа «форсунка» и известные результаты процесса обжима поллой цилиндрической заготовки с дном.

2. Определены, из условия постоянства объема размеры исходной плоской заготовки и геометрические параметры штамповой оснастки для вытяжки и обжима.

3. Определены области использования аналитических зависимостей (6)-(14), позволяющие рассчитать значения толщин, относящихся к элементам донной части, радиусной части пуансона, кромки

цилиндрического стакана при вытяжке с принудительным утонением. Значения толщин элементов заготовки радиусной части пуансона не должны быть меньше минимальной толщины элементов цилиндрического стакана. Толщины элементов донной части должны приближаться к толщинам элементов в зоне диаметра меньшего основания конической детали.

4. Определены усилия процесса вытяжки и обжима.

Следует учесть, что предложенная методика применима для относительных

толщин заготовки  $\frac{S_{\text{сдд}}}{d_{\text{сдд}}} \geq 0,02$  с коэффи-

циентами вытяжки  $K_{\text{в}}=1,5-1,55$  и материалов, обладающих пластичностью с относительной величиной удлинения  $\Delta_{\phi} \geq 25\%$ .

#### Библиографический список

1. Попов, И. П. Направленное изменение толщины листовой заготовки в процессах пластического деформирования: учеб. пособие [Текст] / И. П. Попов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006.

2. Устройство для отбортовки отверстия [Текст] / В. Д. Маслов, И. П. Попов, А. Г. Шляпугин. – Пат. на полезную модель № 61608, 2006.

3. Штамп для вытяжки с обжимом / И. П. Попов, В. Д. Маслов. – Пат. на изобретение №2086331, 1997.

4. Валиев, С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов [Текст] / С. А. Валиев. – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с.

5. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки: учеб. пособие для вузов [Текст] / Е. А. Попов. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

6. Головин, В. А. Технологияковки и объемной штамповки. Ч. 2 Малоотходная объемная штамповка [Текст] / В. А. Головин, А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов. – М.: Машиностроение 1, 2004. – 434 с.

7. Попов, Е. А. Теория обработки металлов давлением [Текст] / Е. А. Попов, М. В. Сторожев. – 4-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

8. Демьяненко, Е. Г. Исследование процесса формообразования цельноштампованных деталей по схеме отбортовка-формовка [Текст] / Е. Г. Демьяненко, И. П. Попов, А. Г. Шляпугин // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 138-145.

#### References

1. Popov, I. P. Directed modification of thickness of a sheet blank during the process of plastic deformation: teaching aid / I. P. Popov – Samara: Samara State Aerospace University, 2006. – 190 pp.

2. Maslov, V. D. Device for flanging holes / V. D. Maslov, I. P. Popov, A. G. Shliapugin – Patent for useful model № 61608, 2006.

3. Popov, I. P. Reducing drawing die / I. P. Popov, V. D. Maslov – Patent for invention № 2086331, 1997.

4. Valiev, S. A. Combined deep drawing of sheets / S. A. Valiev – М.: Mashinostroenie, 1973. – 176 pp.

5. Popov, Ye. A. Basics of sheet forming theory: teaching aid for higher schools / Ye. A. Popov – М.: Mashinostroenie 1, 1977. – 278 pp.

6. Technology of forging and die forging processes. Part 2 Low-waste die forging / V. A. Golovin, A. M. Dmitriev, A. L. Vorontsov – М.: Mashinostroenie 1, 2004. – 434 pp.

7. Popov, Ye. A. Theory of plastic metal forming / Ye. A. Popov, M. V. Storozhev – 4th edition – М.: Mashinostroenie 1, 1977. – 423 pp.

8. Demyanenko, Ye. G. Investigation of the process of forming solid-stamped components according to the flanging – moulding scheme / Ye. G. Demyanenko, I. P. Popov, A. G. Shliapugin / bulletin of Samara State Aerospace University 2006. – №1. – 138-145 pp.

**FORMING PARTS OF THE “ATOMIZER” TYPE FOR AIRCRAFT ENGINES**

© 2010 S. Yu. Zvonov, I. P. Popov, V. A. Mikheyev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper presents the results of research conducted within the framework of the federal programme “Scientific and Pedagogical Specialists of the innovative Russia” for the years 2009-2013. The sequence of designing a part of the “atomizer” type of an aircraft engine is described. It is based on the theory of extrusion processes, in particular, drawing with forced thinning, as well as on simulation using the Deform 2D software.

*Drawing, thinning, thickness, stage, formation, cone, section, coefficient.*

**Информация об авторах**

**Звонов Сергей Юрьевич**, ассистент кафедры обработки металлов давлением. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технологические процессы с направленным изменением толщины заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки. E-mail: [sergei\\_zvonov@mail.ru](mailto:sergei_zvonov@mail.ru).

**Попов Игорь Петрович**, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технологические процессы с направленным изменением толщины заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки. E-mail: [igp\\_popov@mail.ru](mailto:igp_popov@mail.ru).

**Михеев Владимир Александрович**, д.т.н., заведующий кафедрой технологии металлов и авиаматериаловедения, профессор. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технологические процессы в формообразующих операциях листовой штамповки. E-mail: [vamixheev@rambler.ru](mailto:vamixheev@rambler.ru).

**Zvonov Sergey Yuryevitch**, assistant, department of plastic working of metals. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: technological processes with directional modification of blank thickness in sheet-punching form-building operations. E-mail: [sergei\\_zvonov@mail.ru](mailto:sergei_zvonov@mail.ru).

**Popov Igor Petrovitch**, doctor of technical science, professor, department of plastic working of metals. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: technological processes with directional modification of blank thickness in sheet-punching form-building operations. E-mail: [igp\\_popov@mail.ru](mailto:igp_popov@mail.ru)

**Mikheyev Vladimir Alexandrovitch**, doctor of technical science, head of metal technology and aviation materials studying department, professor. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: technological processes with directional modification of blank thickness in sheet-punching form-building operations. E-mail: [vamixheev@rambler.ru](mailto:vamixheev@rambler.ru).