

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИЛЬФОНОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКОЙ

© 2010 В.Ю. Зубарев<sup>1</sup>, В.И. Корольков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество»

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 01.04.2010

В работе представлены исследования технологии изготовления стальных и медных сильфонов методом ротационной вытяжки. Моделируются траектории перемещения инструмента и меридиональная и окружная деформации.

Ключевые слова: *ротационная вытяжка, сильфон, потеря устойчивости пластического деформирования*

Сильфоны, изготавливаемые ротационной вытяжкой, обычно используют в качестве компенсаторов в авиационной и ракетной технике. Преимуществами ротационной технологии изготовления сильфонов перед широко используемой технологией гидроштамповки [1] является высокий ресурс деталей, достигаемый знакопеременным деформированием, и несложная оснастка, позволяющая «открытым» способом изготавливать сильфоны любых размеров от малогабаритных до крупногабаритных.

С целью определения деформированного состояния заготовок сильфонов в процессе обработки поставили модельный эксперимент на медных заготовках [2]. Исследуемый в работе процесс получения заготовки сильфона заключается в формообразовании ротационной вытяжкой (РВ) без оправки на трубчатой заготовке впадины соответствующего профиля. Особенно трудной в технологическом отношении является формовка узкой впадины из-за сложности подтягивания материала в зону деформации. Основной задачей при исследовании операции РВ без преднамеренного утонения заготовок сильфонов являлось определение влияния режимов обработки на деформированное состояние и наличие технологических отказов. За браковочные признаки (отказ материала) принималось появление неустойчивости пластического деформирования, приводящее к получению некачественных

деталей. При потере устойчивости пластического деформирования возможно как возникновение недопустимых локальных утонений, т.е. неустойчивость пластического растяжения, за которым зачастую следует разрушение, так и образование гофр, т.е. неустойчивость пластического сжатия.

Основными факторами, влияющими на процесс получения стабильных качественных заготовок сильфонов ротационной вытяжкой без преднамеренного утонения, являются режимы обработки и геометрия инструмента. Из режимов обработки наиболее существенное влияние оказывает форма траектории движения давящего ролика. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование различных форм траекторий движения инструмента на деформированное состояние и технологические отказы при РВ заготовок сильфонов с целью разработки рекомендаций по выбору оптимальных траекторий. Все прочие режимы обработки и геометрия инструмента при этом были фиксированы.

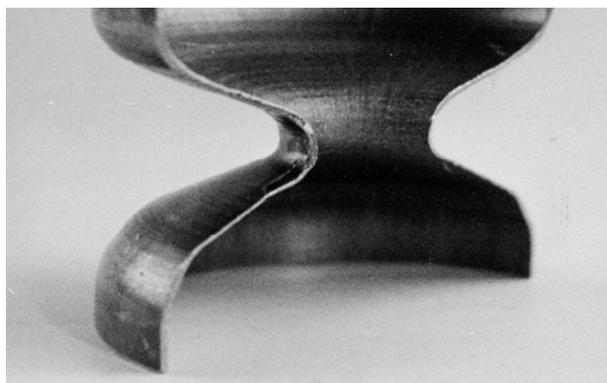
Экспериментальные исследования деформируемого состояния в процессе ротационной вытяжки деталей типа сильфонов проводили с использованием трубчатых заготовок постоянной толщины из меди М2 с внутренним диаметром  $D_0=99$  мм (рис. 1). Толщина заготовок варьировалась в диапазоне  $0,52\div 1,57$  мм. Все реализованные в экспериментах формы траекторий движения инструмента были условно разбиты на две группы. В первую группу были включены траектории, при реализации которых движение рабочего ролика осуществлялась параллельно оси симметрии заготовки. Вторую группу образуют

*Зубарев Виталий Юрьевич, генеральный директор.  
E-mail: admin@air.vrn.ru*

*Корольков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой самолётостроения. E-mail: korolkov\_vi@bk.ru*

траектории, в соответствие с которыми да-  
вильный ролик перемещается под углом к оси  
симметрии заготовки. В свою очередь, в каж-  
дой из двух указанных групп траекторий ре-  
ализовывалась одна из следующих особеннос-  
тей, связанная с набором (перемещением)  
материала в зону впадины:

- подтягивание материала (внедрение ролика)  
с одной стороны;
- попеременное подтягивание материала с  
двух сторон;
- углубление ролика сразу по всей ширине  
впадины;
- углубление ролика по части ширины впадин;
- подтягивание материала из жесткой зоны с  
возвратом ролика к месту начального внедре-  
ния;
- внедрение ролика перпендикулярно оси за-  
готовки;
- внедрение ролика по криволинейной обра-  
зующей.



**Рис. 1.** Экспериментальный образец после деформирования и разрезки

Разрушение происходит в точке наи-  
большого утонения, которое соответствует,  
как правило, наибольшей меридиональной  
деформации  $\varepsilon_m$ . Почти во всех исследованных  
случаях меридиональная деформация по мере  
движения инструмента из жесткой зоны к  
центру впадины резко возрастает и достигает  
своего максимального значения у ее дна,  
вблизи которого со смещением на 2-3 мм и  
происходит наибольшее утонение, приводя-  
щее в большинстве случаев к разрывам. Ок-  
ружная деформация плавно убывает от нуля  
до наименьшего своего значения у дна впа-  
дин, оставаясь во всех исследованных случаях  
по абсолютной величине меньше меридио-  
нальной. Причем отношение деформаций  
 $\varepsilon_m/\varepsilon_\phi$  по абсолютной величине изменяется в  
интервале от 1,05 до 4,4. По мере увеличения  
глубины впадины различие между абсолют-  
ными значениями деформаций уменьшается.

Анализ экспериментальных данных по-  
казывает, что лишь реализация траектории,  
относящаяся к первой группе форм траекто-  
рий, позволила получить деталь с заданной  
глубиной впадины  $h=34$  мм без технологиче-  
ского отказа. Отношение деформаций при  
этом равно 1,37, что весьма близко к опти-  
мальному отношению деформаций, равному  
1,6, которое получилось в работе [3] при вы-  
тяжке гофров сильфона из стали 12X18H10T.  
Кроме того, при реализации траекторий пер-  
вой группы для большей части заготовок уда-  
лось сформировать впадины большей глуби-  
ны, чем на заготовках, деформированных по  
траекториям второй группы. При одинаковой  
глубине впадин у заготовок, деформирован-  
ных по траекториям первой группы, наблюда-  
лась меньшая разнотолщинность, характери-  
зуемая величиной  $C=h_{\min}/h_0$ , где  $h_{\min}$  – мини-  
мальная толщина заготовки во впадине. При  
фиксированной глубине впадины максимал-  
ная меридиональная деформация  $\varepsilon_m$  для боль-  
шинства заготовок, полученных по траектори-  
ям первой группы больше, чем  $\varepsilon_m$  для загото-  
вок, деформированных по траекториям второй  
группы.

На основе анализа результатов модель-  
ного эксперимента разработан алгоритм рас-  
чета операций ротационного выдавливания  
деталей типа «сильфон» из трубчатой загото-  
вки. Принято «кусочное» описание поверхно-  
сти детали в виде отрезков прямых и дуг ок-  
ружностей. Заготовка разбивается на элемен-  
ты равной длины по внешней и внутренней  
поверхности (на каждой поверхности по  $n_\pi$   
элементов). Далее вычисляются координаты  
узлов элементов и записываются в массивы  
 $z_0(i)$ ,  $x_0(i)$  ( $i \in [1, 2n_\pi]$ ). Здесь  $i < n_\pi$  соответствует  
внутренней поверхности, а  $i > n_\pi$  – наружной.  
В дальнейшем будем следить за этими мате-  
риальными точками.

Введем понятие «фиктивная оправка»,  
т.е. условно будем считать, что формообро-  
зование осуществляется на оправке, имеющей  
форму требуемой детали. При этом геометрия  
этой фиктивной оправки может изменяться в  
зависимости от номера прохода  $p$ . Геометрия  
оправки будет вычисляться перед проходом и  
записываться в массивы  $Z_p(i)$ ,  $X_p(i)$ ,  $R_p(i)$ . Гео-  
метрию промежуточных оправок  $p < p_{\max}$  счи-  
таем эквидистантной планируемым траекто-  
риям движения ролика. Здесь  $p_{\max}$  – число  
проходов инструмента без учета калибровоч-  
ного. Будем характеризовать траекторию од-  
ним параметром – глубиной прохода  $h_p$ . Пусть  
глубина прохода будет равномерной, кроме  
последнего и калибровочного. Тогда

$h_p = X_{\max}/p_{\max}$ , где  $X_{\max}$  – глубина наибольшей впадины;  $p_{\max}$  – заданное число проходов. Траектория будет также зависеть и от геометрии оправки  $Z_p(i), X_p(i), R_p(i)$ .

Считая, что после предыдущего прохода  $(p-1)$  известны номера узлов начала  $n_z(j)$  и конца  $k_z(j)$  контакта по зонам деформирования ( $j$  – номер зоны, отсчитывается последовательно от шпинделя станка), определим номера узлов, с которых будет начинаться –  $n(j)$ , и оканчиваться –  $k(j)$ , внедрение инструмента. Рассмотрим два возможных варианта:

1) Глубина прохода  $h_p < \Delta X$ , где  $\Delta X$  – оставшаяся часть глубины впадины для данной зоны после предыдущего прохода; 2 –  $h_p \geq \Delta X$ . В первом случае проход  $p$  будет не последним, во втором случае – проход для данной зоны последний и выполняется по особо заданной траектории. Схема задания траектории показана на рис. 2. Т.е. траектории задаются отрезками прямых, от узла  $n(j)$  по уровню  $h_p(p)$  глубины прохода вертикально вниз, далее горизонтально до узла  $k(j)$ . Форму описания траектории можно использовать прежнюю, т.е. задавать угол наклона элемента  $\vartheta(i)$  относительно оси, перпендикулярно продольной оси детали  $Z$ .

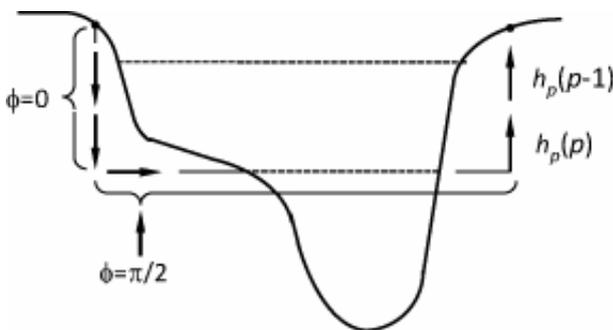


Рис. 2. Схема задания траектории

Во втором случае ( $h_p \geq \Delta X$ ) проход будем считать последним, если  $h_p(p) \leq h_{p\max}$ , где  $h_{p\max}$  – максимальная глубина внедрения для последнего прохода. В противном случае принимаем глубину прохода для данной зоны ( $j$ )

$$h_p^{(j)}(p) = \Delta X - \frac{\Delta h_{p\max} + \Delta h_{p\min}}{2} \quad (1)$$

Рассчитаем меридиональную деформацию  $\varepsilon_m$ . При вычислении  $\varepsilon_m(i)$  будем отталкиваться от средней деформации  $\bar{\varepsilon}_m$  по ручью сильфона. Приращение средней деформации на данном проходе определим по формуле:

$$\bar{\varepsilon}_m = \ln \left( \frac{S_p^j}{S_{p-1}^j} \right) \quad (2)$$

где  $S_p^j$  и  $S_{p-1}^j$  – длины по средней линии зоны  $j$  между узлами  $n_z(j)$  и  $k_z(j)$  на данном ( $p$ ) и предыдущем ( $p-1$ ) проходах.

Длину деформируемой зоны  $S_p^j$  на данном проходе вычислим, исходя из геометрии прохода. Но зона деформирования может быть больше, чем участок  $n_z(j)-1-2-k_z(j)$ , по двум причинам. Во-первых, если геометрии оправок на проходах  $p-1$  и  $p$  отличаются друг от друга. В этом случае будет иметь место деформирование материала за пределами этого участка до узла  $n_z(j)$  и после узла  $k_z(j)$ , не находящегося в контакте с новой оправкой, и подтягивание его в зону деформирования. В этой ситуации необходимо  $S_{p-1}^j$  и  $S_p^j$  рассчитывать в пределах  $n_z(j) \div k_z(j)$ . Во-вторых, если для подтягивания материала используется раскатка, т.е. принудительное утонение материала на оправке, то по степени утонения  $\mu_i$  вычисляем перемещаемую добавочную длину заготовки  $\Delta S$ :

$$\bar{\varepsilon}_m = \ln \left( \frac{S_p^j}{S_{p-1}^j + \Delta S} \right) \quad (3)$$

Окружная деформация  $\varepsilon_\varphi$  вычисляется после расчета координат узлов после прохода по формуле

$$\varepsilon_\varphi = \ln \left( \frac{z(i)}{z_0(i)} \right) \quad (4)$$

Деформация по толщине  $\varepsilon_z$  вычисляется из условия постоянства объема:

$$\varepsilon_z = -\varepsilon_m - \varepsilon_\varphi \quad (5)$$

Т.к.  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  вычисляются в конце расчета, то требуется задать закон распределения лишь  $\varepsilon_m$ . Сравнение графиков распределения деформаций по одной ветви впадины сильфона и уступу ступени показало их сходство. Поэтому используем закон распределения  $\varepsilon_m$ , представленный в работе [4]. В связи с тем, что возможна значительная разнотолщинность детали, размер заготовки следует выбирать из условия постоянства объема:

$$V_3 = V_d (1 + k_{пр}) , \quad (6)$$

где  $V_d$  – объем детали;  $k_{пр}=0,04\div0,1$  – коэффициент, определяющий технологический припуск. Объем детали, если известен закон распределения толщин  $h(S)$ , рассчитаем по формуле:

$$V_d = \sum_{i=1}^{n_i} F_i h_i , \quad (7)$$

где  $n_i$  – число участков, а  $F_i$  – площадь поверхности участка детали. Если  $h(S)$  неизвестно, то приближенно рассчитываем объем детали по формуле

$$V_d = 0,8h_0 \cdot \sum_{i=1}^{n_i} F_i , \quad (8)$$

где  $h_0$  - толщина заготовки. Длина заготовки рассчитывается по формуле

$$L_3 = \frac{V_3}{\pi \cdot D \cdot h_0} . \quad (9)$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Добровольский, И.Г.* Современная технология изготовления сильфонных заготовок // *Металлургия*. – Минск. – 1990. - №24. – С.106- 109.
2. *Томилов, Ф.Х.* Экспериментальное исследование деформированного состояния и технологических отказов при ротационной вытяжке заготовок сильфонов / *Ф.Х. Томилов, С.П. Попов, В.В. Смирнов, В.И. Корольков* // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1994. - №5. – С. 9-11.
3. *Петровский, В.В.* Оптимальные условия деформирования трубной заготовки при вытяжке гофров сильфона // *Расчеты на прочность*. – М.: Машиностроение. – 1990. - №31. – С. 176-182.
4. *Корольков, В.И.* Моделирование деформированного состояния заготовки при ротационной вытяжке без преднамеренного утонения // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2001. - №7. – С. 40-44.

## TECHNOLOGY OF MAKING THE METAL BELLOWS BY ROTATIONAL ROLLING-OUT

© 2010 V.Yu. Zubarev<sup>1</sup>, V.I. Korolkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC «Voronezh Aircraft Joint-Stock Company»

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University

In paper the researches of making technology of steel and copper bellows by a method of rotational rolling-out are presented. Trajectories of the instrument moving and meridional and circumferential deformations are modeled.

Key words: *rotational rolling-out, bellow, loss of plastic deformation stability*