

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГИБКЕ ПАТРУБКОВ РАЗДАЧЕЙ

©2009 О. Ю. Давыдов<sup>1</sup>, В. Г. Егоров<sup>2</sup>, А. И. Кочегаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежская государственная технологическая академия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля, г. Воронеж

Представлены результаты моделирования кинематически возможного поля скоростей, описывающего процесс пластической деформации трубной заготовки при гибке патрубков раздачей.

*Моделирование, поле скоростей, пластическая деформация, патрубки, гибка раздачей, штампы*

При постановке производства широкофюзеляжных самолётов возникла проблема получения сверхтонкостенных ( $\frac{D}{t} > 130$ ) высокоресурсных трубопроводов с толщиной стенки от 0,5 до 0,8 мм из титановых сплавов и коррозионностойких сталей с наружным диаметром от 50 до 120 мм. Традиционные способы гибки проталкиванием [1] с внутренним давлением уже не позволяют получить качественные патрубки из особо тонкостенных и сверхтонкостенных труб из-за возникновения в процессе формообразования следующих дефектов:

- для крутоизогнутых патрубков – поперечные гофры в зоне контакта трубы с пуансоном проталкивания и в зоне малого радиуса изгиба;

- ступенчатых патрубков – недоформовка наружного контура и поперечные гофры в зоне малого радиуса изгиба.

Для формообразования сверхтонкостенных крутоизогнутых и ступенчатых патрубков наиболее приемлемым является технологический процесс штамповки раздачей с применением в качестве наполнителя эластичных сред.

Формообразование патрубков осуществляют в штампах с разъёмными в вертикальной плоскости полуматрицами (рис. 1).

Заготовкой при штамповке патрубка является отрезок трубы наружным радиусом  $r_0$  и толщиной  $t$ . Рассмотрим конечную стадию формообразования как наиболее важную с точки зрения обеспечения необходимого качества детали.

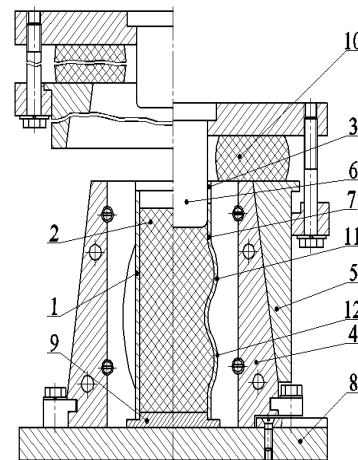


Рис. 1. Схема процесса штамповки патрубков раздачей эластичными средами:  
1 – трубная заготовка; 2 – эластичный наполнитель; 3 – прямолинейный канал штампа; 4 – полуматрица; 5 – контейнер; 6 – нажимной пуансон; 7 – отформованная деталь; 8 – основание; 9 – направляющая; 10 – эластичный буфер; 11, 12 – элементы криволинейного канала штампа

В силу наличия поперечной плоскости симметрии проанализируем процесс пластического формообразования левой части патрубка. Для моделирования кинематики в пределах этой части выделим 4 зоны (рис. 2).

### Зона 4

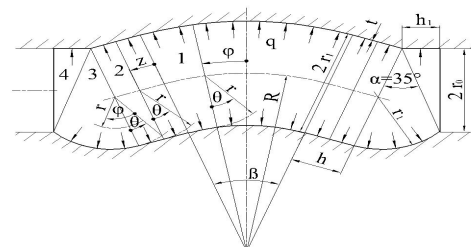


Рис. 2. Зоны, выделяемые при моделировании кинематики пластического течения при гибке патрубков раздачей

Зона 4 является частью исходной трубной заготовки и расположена вне основного

очага деформации. Деформации в данной зоне мало влияют на величину потребного для реализации гибки внутреннего давления  $q$ . Поэтому при анализе процесса формообразования эту зону рассматривать не будем.

#### Зона 1

Для описания геометрии зоны 1 используем тороидальную систему координат  $r, \theta, \varphi$  (рис.2). Границы зоны в этой системе координат определяются соотношениями

$$r_1 - t \leq r \leq r_1; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi; \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\beta}{2}.$$

Поле скоростей, моделирующее пластическое течение в каждой зоне патрубка, должна удовлетворять условию несжимаемости и кинематическим краевым условиям

Условие несжимаемости имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_\varphi = 0, \quad (1)$$

где компоненты  $\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_\varphi$  тензора скоростей деформаций в тороидальной системе координат равны

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r};$$

$$\dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{1}{R - r \cos \theta} \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - V_r \cos \theta \right). \quad (2)$$

В связи с тем, что при гибке раздачей перемещения поперечного сечения в окружном направлении отсутствуют, в соотношениях (2) принято  $V_\theta = 0$ .

Кинематические краевые условия определяются соотношениями

$$V_r|_{r=r_1} = 0; \quad V_\varphi|_{\varphi=0} = 0. \quad (3)$$

На конечной стадии формообразования патрубка трубная заготовка по всей длине соприкасается с ограничивающей её течение стенкой матрицы. В результате этого под действием внутреннего давления  $q$  начинает происходить равномерно распределённое по поверхности сжатие заготовки в радиальном направлении. Поэтому для радиальной компоненты скорости можно принять

$$V_r = \frac{C}{r} - r,$$

где постоянная  $C$  определяется из условия выполнения соотношений (3):

$$V_r|_{r=r_1} = \frac{C}{r_1} - r_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad C = r_1^2.$$

Тогда

$$V_r = \frac{r_1^2}{r} - r. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (4) в (1), находим осевую компоненту скорости  $V_\varphi$ :

$$V_\varphi = \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \varphi + f_1(r, \theta).$$

Постоянную интегрирования  $f_1(r, \theta)$  определяем из условий (3):

$$V_\varphi|_{\varphi=0} = f_1(r, \theta) = 0 \quad \Rightarrow \quad f_1(r, \theta) = 0.$$

Таким образом

$$V_\varphi = \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \varphi.$$

В итоге поле скоростей для зоны 1 имеет вид

$$V_r = \frac{r_1^2}{r} - r, \quad V_\theta = 0,$$

$$V_\varphi = \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \varphi. \quad (5)$$

#### Зона 2

Геометрию зоны 2 будем описывать в цилиндрической системе координат  $r, \theta, z$  (рис. 1). Границы зоны в данной системе определяются выражениями

$$r_1 - t \leq r \leq r_1; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi; \quad 0 \leq z \leq h.$$

Условие несжимаемости имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z = 0, \quad (6)$$

а компоненты  $\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_z$  тензора скоростей деформаций определяются по формулам

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}; \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}. \quad (7)$$

В (7), так же как и в (2), принято  $V_\theta = 0$ .

Кинематические краевые условия для зоны 2 имеют вид

$$V_r|_{r=r_1} = 0; \quad V_z|_{z=0} = V_\varphi|_{\varphi=\frac{\beta}{2}};$$

$$V_r^{(2)}|_{z=0} = V_r^{(1)}|_{\varphi=\frac{\beta}{2}}. \quad (8)$$

Принимаем, что в зоне 2 радиальная компонента скорости  $V_r$  определяется по формуле (4). При этом два условия из (8) будут выполнены. Подставляя (4) и (7) в (6), определяем осевую компоненту скорости  $V_z$ :

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 2,$$

откуда

$$V_z = 2z + f_2(r, \theta). \quad (9)$$

Постоянную интегрирования  $f_2(r, \theta)$  в (9) найдём из третьего краевого условия (8):

$$\begin{aligned} V_z|_{z=0} = f_2(r, \theta) &= V_\varphi|_{\varphi=\frac{\beta}{2}} = \\ &= \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow f_2(r, \theta) &= \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2}. \end{aligned}$$

Тогда

$$V_z = 2z + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2}.$$

Окончательно для зоны 2 поле скоростей имеет вид:

$$V_r = \frac{r_1^2}{r} - r; \quad V_\theta = 0;$$

$$V_z = 2z + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2}. \quad (10)$$

### Зона 3

Зона 3 представляет собой часть полушеры радиусом  $r_1$ , центр которой расположен на оси в крайнем сечении цилиндрического участка 2. Для описания геометрии данной зоны используем сферическую систему координат  $r, \theta, \varphi$  (рис. 2).

При определении границ зоны 3 принимаем, что эта зона сопрягается с зоной 4 по поверхности конуса с длиной образующей  $r_1$ , вершина которого совпадает с центром сферы, а основание образует с торцевой поверхностью зоны 2 угол  $\alpha$  (рис.3).

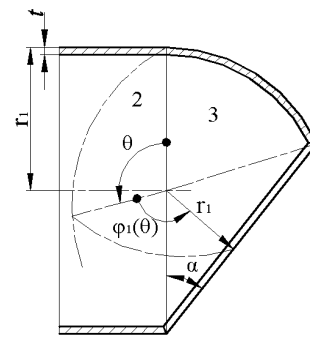


Рис. 3. Определение границ зоны 3

Для определения границ зоны 3 найдём угол  $\varphi_1(\theta)$ , показанный на рис. 4.

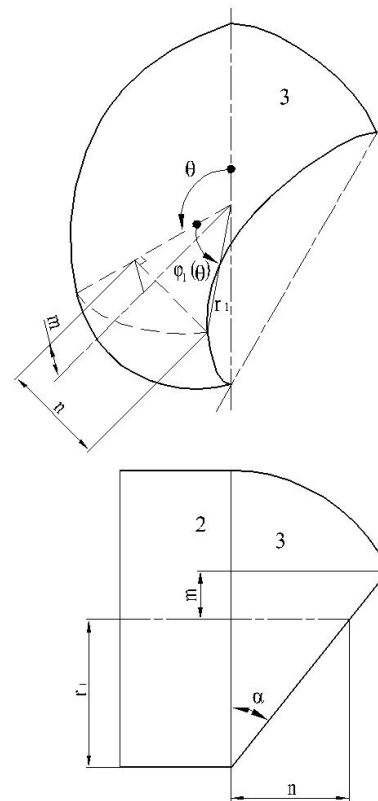


Рис. 4. Нахождение угла  $\varphi_1(\theta)$

Из рис. 4 находим

$$\begin{aligned} n &= r_1 \sin \varphi_1; \quad m = r_1 \cos \varphi_1 \cos \theta; \\ n &= (r_1 + m) \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned}$$

Тогда будем иметь:

$$\sin \varphi_1 = [1 + \cos \varphi_1 \cos \theta] \operatorname{tg} \alpha. \quad (11)$$

Значения  $\varphi_1(\theta)$  при  $\beta = 30^\circ$ ,  $D = 80 \text{ мм}$ ;  $100 \text{ мм}$ ;  $120 \text{ мм}$ ,  $R = D$ ,  $\alpha = 22^\circ$ , удовлетворяющие (11), представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Значения  $\varphi_1(\theta)$  при  $\beta = 30^\circ$   $\alpha = 22^\circ$

$\theta,$ рад	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$
$\varphi_1,$ рад	0,76 8	0,72 8	0,60 7	0,41 6	0,20 8	0,05 5	0

В результате аппроксимации данных табл. 1 получено, что соотношение (11) будет приближенно выполняться при  $\varphi_1(\theta) = 8,96 \cdot 10^{-3} \theta^4 - 0,167 \theta^2 + 0,772$ .

Значения  $\varphi_1(\theta)$  при  $\beta = 45^\circ$ ,  $D = 80 \text{ мм}$ ;  $100 \text{ мм}$ ;  $120 \text{ мм}$ ,  $R = D$ ,  $\alpha = 33^\circ$ , удовлетворяющие (11), представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Значения  $\varphi_1(\theta)$  при  $\beta = 45^\circ$  и  $\alpha = 33^\circ$

$\theta,$ рад	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$
$\varphi_1,$ рад	1,15 2	1,11 4	0,98 0	0,70 7	0,352	0,09 0	0

Тогда (11) будет приближенно выполняться при  $\varphi_1(\theta) = 0,012 \theta^4 - 0,236 \theta^2 + 1,186$ .

Таким образом, границы зоны 3 определяются неравенствами  $r_1 - t_1 \leq r \leq r_1$ ;  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ;  $0 \leq \varphi \leq \varphi_1(\theta)$ .

Так же, как и в зонах 1 и 2, принимаем  $V_\theta = 0$ .

Условие несжимаемости в сферической системе координат имеет вид

$$\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_\varphi = 0, \quad (13)$$

где компоненты  $\dot{\epsilon}_r$ ,  $\dot{\epsilon}_\theta$ ,  $\dot{\epsilon}_\varphi$  тензора скоростей деформаций определяются по формулам

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{r}(V_r - V_\varphi \text{tg} \varphi);$$

$$\dot{\epsilon}_\varphi = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_r \right). \quad (14)$$

Кинематические краевые условия определяются соотношениями

$$V_r|_{r=r_1} = 0; \quad V_\varphi|_{\varphi=0} = V_z|_{z=h};$$

$$V_r^{(3)}|_{\varphi=0} = V_r^{(2)}|_{z=h}. \quad (15)$$

Как и для зон 1 и 2, принимаем, что радиальная компонента вектора скорости  $V_r$  определяется по формуле (4). При этом будут выполняться два условия (15). Подставляя (4) и (14) в (13), находим

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \cos \varphi - V_\varphi \sin \varphi + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \varphi = 0,$$

следовательно,

$$V_\varphi = \left( 3r - \frac{r_1^2}{r} \right) \text{tg} \varphi + \frac{f_3(r, \theta)}{\cos \varphi}. \quad (16)$$

Постоянную интегрирования  $f_3(r, \theta)$  в (16) находим из условий (15):

$$f_3(r, \theta) = 2h + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2}.$$

Тогда

$$V_\varphi = \left( 3r - \frac{r_1^2}{r} \right) \text{tg} \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \left\{ 2h + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2} \right\}.$$

В итоге поле скоростей для зоны 3 имеет вид

$$V_r = \frac{r_1^2}{r} - r; \quad V_\theta = 0;$$

$$V_\varphi = \left( 3r - \frac{r_1^2}{r} \right) \text{tg} \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \times \left\{ 2h + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2} \right\}. \quad (17)$$

Таким образом, согласно полученным зависимостям (5), (10) и (17), кинематика пластического течения при гибке раздечей на конечной стадии формообразования описывается следующими соотношениями:

зоны 1, 2, 3  $V_r = \frac{r_1^2}{r} - r; \quad V_\theta = 0;$

зона 1  
 $V_\varphi = \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \varphi;$

зона 2  
 $V_z = 2z + \left[ 2R + \left( \frac{r_1^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2};$

зона 3

$$V_{\varphi} = \left( 3r - \frac{r_i^2}{r} \right) \operatorname{tg} \varphi + \frac{I}{\cos \varphi} \left\{ 2h + \left[ 2R + \left( \frac{r_i^2}{r} - 3r \right) \cos \theta \right] \frac{\beta}{2} \right\}.$$

Полученные результаты позволяют подбирать наиболее оптимальные параметры при составлении технологических процессов гибки патрубков раздачей.

### Библиографический список

1. Руководящий технический материал РТМ 1.4.1638-86. Конструктивно-технологическая отработка трубопроводных коммуникаций, изготовление и контроль труб и патрубков. – НИАТ, 1988. – 576с.

### References

1. RTM 1.4.1638-86. Is constructive-technological working off of pipeline communications, manufacturing and the control of pipes and branch pipes. – NIAT, 1988. – 576p.

## THE MODELING OF KINEMATICS OF PLASTIC CURRENT AT BENDING PROCESS OF BRANCH PIPES DISTRIBUTION

©2009 O. Y. Davidov<sup>1</sup>, V. G. Egorov<sup>2</sup>, A. I. Kochegarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technology Academy

<sup>2</sup>The Scientific research Institute of the Automated Means of Production and Control (Voronezh)

Results of modeling cinematically the possible field of speeds describing process of plastic deformation of trumpet preparation at bending process of pipers by distribution in stamps are submitted.

*Modeling, field of speeds, plastic deformation, trumpets, bending process by distribution, stamps*

### Информация об авторах

**Давыдов Олег Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент Воронежской государственной технологической академии. Тел. (4732) 55-47-20. Область научных интересов: обработка металлов давлением.

**Егоров Владислав Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Научно-исследовательского института автоматизированных средств производства и контроля. Тел. (4732) 75-30-52. E-mail: [akvapaskal@intercon.ru](mailto:akvapaskal@intercon.ru). Область научных интересов: технология самолётостроения.

**Кочегаров Александр Иванович**, заведующий сектором Научно-исследовательского института автоматизированных средств производства и контроля. Тел. (4732) 75-30-52. E-mail: [akvapaskal@intercon.ru](mailto:akvapaskal@intercon.ru). Область научных интересов: технология самолётостроения.

**Davidov Oleg Yurievich**, the candidate of Technical Sciences, the lecturer of Voronezh State Technology Academy. Phone (4732) 55-47-20. Area of research: processing metals with a pressure.

**Egorov Vladislav Gennadievich**, the doctor of Technical Sciences, professor, general director of the Scientific research Institute of the Automated Means of Production and Control. Phone (4732) 75-30-52. E-mail: [akvapaskal@intercon.ru](mailto:akvapaskal@intercon.ru). Area of research: aircraft technology.

**Kochegarov Alexander Ivanovich**, the manager of department of the Scientific research Institute of the Automated Means of Production and Control, Voronezh. Phone (4732) 75-30-52. E-mail: [akvapaskal@intercon.ru](mailto:akvapaskal@intercon.ru). Area of Research: aircraft technology.