

УДК 621.981.12

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ БОРТОВ ДЕТАЛЕЙ САМОЛЁТОВ

© 2018 В.К. Моисеев¹, М.Н. Мантусов², А. Н. Плотников¹, О.В. Ломовской¹, А.А. Шаров¹¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева² Ульяновский филиал конструкторского бюро ПАО «Туполев»

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

Материал, изложенный в статье, посвящён аналитическому моделированию процесса формовки криволинейных бортов с наложением стеснённого изгиба эластичным инструментом. Стеснённый изгиб позволяет получить гораздо меньшие, чем при обычной штамповке, радиусыгиба, утолщение стенок деталей, что повышает жесткость изделий, прочность, а также минимизирует массу, что особенно важно для авиационной и ракетно-космической техники. На основе классических уравнений теории обработки металлов давлением получены взаимосвязи напряжений, деформаций, давления эластомера, геометрии детали, механических характеристик материала детали. Полученные зависимости предоставляют возможность разработки методик проектирования технологических процессов, а именно расчётов размеров заготовок, необходимых силовых параметров. Также предоставляется возможность прогнозировать величину изменения толщины стенок изготавливаемых деталей.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, технологический процесс, штамповка эластомером, изгиб борта, стеснённый изгиб, давление, деформации, напряжения, пластичность металла, заготовка, деталь.

В условиях современного производства летательных аппаратов широко распространён способ изготовления деталей каркаса из листового полуфабриката методами штамповки эластомером, как наиболее эффективный для указанного производства. В последнее время всё чаще применяется модификация данного способа – способ штамповки эластомером в условиях стеснённого изгиба [1].

Этот способ позволяет получить детали каркаса повышенной точности, обеспечивающие наиболее точное воспроизведение внешних обводов летательных аппаратов. Указанный способ достаточно исследован и прошёл апробацию, для него разработаны методики, позволяющие проектировать технологические процессы изготовления деталей каркаса повышенной точности, имеющих борта с прямой линиейгиба. Но конструкция летательных аппаратов включает в свой состав детали каркаса типа нервюр и диафрагм, содержащие множество упомянутых конструктивных элементов в виде борта с линиейгиба, представляющей кривую разной степени порядка.

Для внедрения в производство новых технологий штамповки эластомером стеснённым изгибом деталей каркаса повышенной точности, содержащих такой конструктивный элемент, как борт с линиейгиба в виде кривой, необходима методика, позволяющая рассчитать технологические параметры процесса получения деталей указанного класса. В основе данной методики, как и основе любой другой, должна лежать математическая модель, полученная в аналитическом виде, что наиболее приемлемо для проектирования технологии. Для достижения этой цели в данной публикации представлено аналитическое математическое моделирование реализации стеснённого изгиба в процессе гибки эластомером в случае криволинейного контурагиба.

Для моделирования рассмотрена схема процесса гибки эластомером криволинейного борта с постоянным радиусом кривизны R в плане с эффектом стеснённого изгиба, представленная на рисунке 1. На указанном рисунке изображено поперечное сечение гибочной оснастки в совокупности с обрабатываемой деталью. Технология процесса гибки эластомером в режиме стеснённого изгиба аналогична для случаев прямолинейного и криволинейного бортов. Всё различие параметров гибки эластомером для прямолинейных и криволинейных бортов заключено в геометрии гибочной оснастки, а именно в значении радиуса кривизны гибочно-го пуансона в проекции в плане.

Математическая модель процесса гибки эластомером в условиях стеснённого изгиба призвана установить взаимосвязь геометрических

Моисеев Виктор Кузьмич, доктор технических наук, профессор. E-mail: moiseevvk@mail.ru

Мантусов Михаил Николаевич, ведущий инженер-конструктор. E-mail: mishaufkb@ya.ru

Плотников Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: anplotnikov@ya.ru

Ломовской Олег Владиславович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: oleg.lomovskoi@ya.ru

Шаров Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: aa.sharov@ya.ru

и силовых параметров процесса с конструктивными параметрами деталей с тем, чтобы полученные аналитические выражения использовать для разработки методики проектирования технологий штамповки эластомером деталей самолётов и других летательных аппаратов.

Одним из важных геометрических параметров процесса гибки эластомером, является припуск на кромке формблока D , обеспечивающий реализацию процесса стеснённого изгиба, который может быть определён из уравнения, описывающего линию поперечного сечения внутренней поверхности заготовки в области складки.

Для определения данного параметра обозначим r , H , R , как радиус формблока, высоту борта после первого перехода гибки, радиус линиигиба борта соответственно. Радиус заготовки, определяемый по геометрическим параметрам внутренней поверхности детали, полученной после первого перехода гибки составит:

$$L = R + H_0 - \frac{4 - \pi}{2} r + \Delta, \quad (1)$$

где D – величина припуска по высоте борта, задаваемая размерами заготовки (значением толщины) при использовании подкладной плиты 4 (рисунок 1).

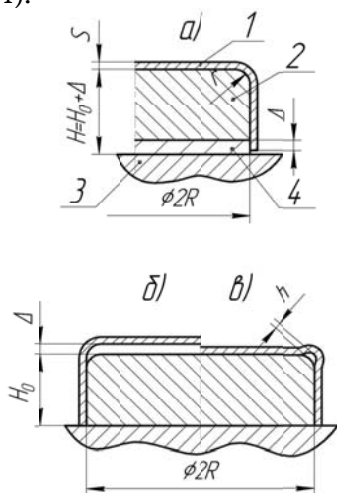


Рис. 1. Схема процесса гибки эластомером с эффектом «стеснённого изгиба» (эластомер и контейнер условно не показан):

- 1 – заготовка; 2 – формблок;
- 3 – подштамповая плита; 4 – подкладная плита.
- а – окончание первой операции гибки;
- б – начало второго перехода гибки;
- в – фаза второго перехода гибки, характеризующаяся окончанием формирования складки

Профиль складки, образовавшейся в начале выполнения второго перехода гибки эластомером аппроксимируем следующей зависимостью:

$$\rho(\varphi) = r + h \cos^2(2\varphi), \quad -\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}. \quad (2)$$

С учётом этого радиус заготовки составит:

$$L = R + H_0 - 2r + 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{\rho^2(\varphi) + \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)^2} d\varphi. \quad (3)$$

Приравняв (1) и (3), после преобразований получаем выражение для определения величины припуска борта по высоте:

$$\Delta = \frac{2r}{3h(\bar{h} + 2)} \left[\left(1 + \bar{h}(\bar{h} + 2)\right)^{3/2} - 1 \right], \quad (4)$$

где безразмерная величина $\bar{h} = h / r$.

Важнейшим силовым параметром процесса стеснённого изгиба является необходимое давление эластичной среды, при котором реализуется процесс стеснённого изгиба. Для определения этого давления эластомера в случае реализации стеснённого изгиба с криволинейным контуромгиба при формулировке краевой задачи в напряжениях в качестве исходных примем следующие соотношения [2]:

Уравнение равновесия

$$\sigma_\varphi(\rho) = \sigma_\rho(\rho) + \rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho},$$

$$r + h \leq \rho \leq r + h + s, \quad (5)$$

где ρ , φ – цилиндрические координаты в очаге деформации (осью z служит линия контура борта); σ_ρ , σ_φ – радиальная и окружная компоненты главных напряжений соответственно; s – толщина стенки борта

Энергетическое условие Губера-Мизеса

$$(\sigma_\rho - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 = 2\sigma_T^2, \quad (6)$$

где σ_z – осевая компонента главных напряжений, σ_T – предел текучести материала детали.

Внутреннюю поверхность заготовки положим свободной от внешней радиальной нагрузки, т. е.

$$\sigma_\rho|_{\rho=r+h} = 0. \quad (7)$$

При формовке борта с замкнутым контуром в зависимости от знака кривизны радиуса R очаг деформации претерпевает либо осевое сжатие, либо осевое растяжение, величина которого ограничена пределом устойчивости (образования гофра). При формовке борта с незамкнутым контуром величина σ_z может изменяться в зависимости от ширины борта от 0 до $-p$. Для конкретного примера рассмотрим один из этих случаев, а именно величину осевого сжатия положим равной давлению эластичной среды, пренебрегая радиальным градиентом, т. е.

$$\sigma_z(\rho) = -p, \quad (8)$$

где p – величина давления эластичной среды.

Вводя обозначение $\sigma_\rho(\rho) = \sigma(\rho)$ и объединяя (1) и (2), получим

$$\left(\rho \frac{d\sigma}{d\rho}\right)^2 + (\sigma + \delta)^2 + \left(\rho \frac{d\sigma}{d\rho} + \sigma + \delta\right)^2 = 2\sigma_T^2. \quad (9)$$

Переходя к относительной переменной $\xi(\rho) = \frac{\sigma(\rho) + p}{\sigma_T}$, приводим (9) к виду:

$$\left(\rho \frac{d\xi}{d\rho}\right)^2 + \xi\rho \frac{d\xi}{d\rho} + (\xi)^2 = 1, \quad (10)$$

а однородное граничное условие (7) переместится на рабочую поверхность заготовки:

$$\xi(\rho)|_{\rho=r+h+s} = 0. \quad (11)$$

Таким образом, возникает краевая задача первого порядка следующего вида:

$$\begin{cases} \left(\rho \frac{d\xi}{d\rho}\right)^2 + \xi\rho \frac{d\xi}{d\rho} + (\xi)^2 - 1 = 0. \\ \xi(r+h+s) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Разрешая дифференциальное уравнение (12) относительно $\rho \frac{d\xi}{d\rho}$, получаем:

$$\rho \frac{d\xi}{d\rho} = -\frac{\xi \pm \sqrt{4 - 3\xi^2}}{2}.$$

Из условия $\frac{d\xi}{d\rho} < 0$ выбираем ветвь, соответствующую «+», т.е.

$$\rho \frac{d\xi}{d\rho} = -\frac{\xi + \sqrt{4 - 3\xi^2}}{2}.$$

Разделяя в последнем уравнении переменные, находим интеграл, соответствующий граничному условию (12) в виде обратной функции:

$$\rho = (r+h+s) \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\sqrt{3} \operatorname{arcsin}\left(\frac{\sqrt{3}\xi}{2}\right) + \ln\left(\sqrt{1 - \frac{3}{4}\xi^2} + \frac{\xi}{2}\right)\right]\right\},$$

$$r+h \leq \rho \leq r+h+s, \quad 0 \leq \xi \leq \frac{2}{\sqrt{3}}. \quad (13)$$

Или, переходя к относительной переменной:

$$t = \frac{\rho}{r+h+s}, \quad \frac{r+h}{r+h+s} \leq t \leq 1,$$

$$t = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\sqrt{3} \operatorname{arcsin}\left(\frac{\sqrt{3} \cdot \xi}{2}\right) + \ln\left(\sqrt{1 - \frac{3}{4}\xi^2} + \frac{\xi}{2}\right)\right]\right\},$$

$$+ \ln\left(\sqrt{1 - \frac{3}{4}\xi^2} + \frac{\xi}{2}\right)\right\}. \quad (14)$$

И ещё одним важным параметром, необходимым для проектирования технологий штамповки эластомером в условиях стеснённого изгиба, является степень утолщения материала детали в зоне радиусного перехода, соединяющего стенку и борт. Для предоставления возможности вычислить указанную степень утолщения решалась краевая задача в деформациях (перемещениях).

Первым исходным соотношением примем условие несжимаемости [2]:

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\phi + \varepsilon_z = 0, \quad (15)$$

где $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\phi, \varepsilon_z$ – главные компоненты деформаций в цилиндрических координатах.

Рассмотрим так же, как и выше конкретную задачу по стеснённому изгибу борта замкнутого контура со сжатием по оси z. Осевую деформацию положим постоянной, в первом приближении равной относительному укорочению зоны складки борта при посадке на формблок

$$\varepsilon_z = -\frac{h}{R}, \quad (16)$$

где R – радиус кривизны борта в плане; h – зазор заготовки по кромке формблока в момент обжатия складки.

Радиальная и окружная компоненты деформации из условия неразрывности (совместности) определяются радиальным перемещением

$$\varepsilon_\rho(\rho) = \frac{dU(\rho)}{d\rho}, \quad \varepsilon_\phi(\rho) = \frac{U(\rho)}{\rho},$$

$$r+h \leq \rho \leq r+h+s, \quad (17)$$

где r – радиус кромки формблока; s – толщина заготовки; U(ρ) – радиальное перемещение в очаге деформации.

Граничное условие для U(ρ) зададим в точке $\rho = r+h$, определив его как посадку заготовки на формблок, т.е.

$$U(r+h) = -h, \quad (18)$$

Подставляя (16), (17) в (15) и объединяя с (18), после элементарных преобразований получаем краевую задачу в перемещениях (первого порядка):

$$\begin{cases} \frac{d}{d\rho}(\rho \cdot U) = \rho \frac{h}{R}, & r+h \leq \rho \leq r+h+s \\ U(r+h) = -h \end{cases}, \quad (19)$$

Интегрируя (19), получаем:

$$U(\rho) = \frac{h}{2R} \left\{ \rho - \frac{r+h}{\rho} (2R + r+h) \right\}. \quad (20)$$

Таким образом, компоненты главных де-

формаций в очаге деформирования составят:

$$\begin{cases} \varepsilon_\rho = \frac{h}{2R} \left[1 + \frac{(r+h)}{\rho^2} (2R+r+h) \right] \\ \varepsilon_\varphi = \frac{h}{2R} \left[1 - \frac{(r+h)}{\rho^2} (2R+r+h) \right] \\ \varepsilon_z = -\frac{h}{R} \end{cases}, (21)$$

или

$$\begin{cases} \varepsilon_\rho = \frac{h(r+h)}{\rho^2} + \frac{h}{2R} \left[\frac{(r+h)^2}{\rho^2} + 1 \right] \\ \varepsilon_\varphi = -\frac{h(r+h)}{\rho^2} - \frac{h}{2R} \left[\frac{(r+h)^2}{\rho^2} - 1 \right] \\ \varepsilon_z = -\frac{h}{R} \end{cases}. (22)$$

Для определения минимальной величины припуска, приводящей к утолщению стенки за счёт пластических деформаций складки, прием условие достижения интенсивностью деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\rho - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_z)^2}, (23)$$

на внешней поверхности заготовки при $\rho = r + h + s$ величины, соответствующей началу пластических деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_T}{E}. (24)$$

Подставляя деформации (22) в (23) с учётом (24), переходя к безразмерным параметрам

$$\alpha = \frac{r}{R}, \quad \Theta = \frac{s}{r}, \quad \xi = \frac{h}{r}, \quad \lambda = \frac{\sigma_T}{E} (25)$$

и пренебрегая членами второго порядка малости $O(\alpha^2)$, получаем выражение, определяющее минимальную величину складки h , а значит и минимальный припуск, приводящие к утолщению стенки при пластической осадке складки на кромку формблока:

$$\frac{\xi(1+\xi)}{(1+\Theta+\xi)} \left(1 + \frac{\alpha(1+\xi)}{2} \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \lambda. (26)$$

В результате проведенных теоретических исследований получены аналитические выражения, связывающие технологические параметры процесса с параметрами детали и полуфабриката. Полученные результаты позволяют разрабатывать методики проектирования усовершенствованной технологии гибки криволинейных бортов деталей самолётов и других летательных аппаратов давлением эластомеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стеснённый изгиб в холодной листовой штамповке эластомером / В.Г. Кулаков, В.К. Моисеев, А.А. Шаров, О.В. Ломовской, А.Н. Плотников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. № 6(4). Т. 15. С. 855-860.
2. Расчеты на прочность в машиностроении. Том 2 / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, Н. Н. Малинин, В. И. Феодосьев [под ред. С. Д. Пономарева]. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. 974 с.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF BENDING CURVED SIDES OF AIRCRAFT PARTS

© 2018 V.K. Moiseev¹, M.N. Mantusov², A.N. Plotnikov¹, O.V. Lomovskoi¹, A.A. Sharov¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

² Ulyanovsk Branch of the Design Bureau of PJSC «Tupolev»

The material presented in the article is devoted to analytical modeling of the process of forming curvilinear sides with the imposition of constrained bending with an elastic tool. The constrained bend allows to obtain much smaller bending radii than with conventional punching, thickening of the walls of parts, which increases the rigidity of products, strength, and also minimizes mass, which is especially important for aviation and rocket and space technology. On the basis of the classical equations of the theory of metal processing by pressure, relationships between stresses, strains, elastomer pressure, part geometry, and mechanical characteristics of the part material are obtained. The dependences obtained provide an opportunity to develop methods of designing technological processes, namely, calculating the size of the blanks, the necessary power parameters. It is also possible to predict the magnitude of the change in wall thickness of the parts produced.

Keywords: metal forming by pressure, technological process, elastomer punching, bend bending, constrained bending, pressure, deformation, stress, metal ductility, workpiece, part

Viktor Moiseev, Doctor of Technical Sciences, Professor.
E-mail: moiseevvk@mail.ru
Mikhail Mantusov, Leading Design Engineer.
E-mail: mishaufkb@ya.ru
Andrey Plotnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor. E-mail: anplotnikov@ya.ru
Oleg Lomovskoi, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: oleg.lomovskoi@ya.ru
Andrey Sharov, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor. E-mail: aa.sharov@ya.ru