

УДК 621.981.12

СТЕСНЕННЫЙ ИЗГИБ В ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ ЭЛАСТОМЕРОМ

© 2013 В.Г. Кулаков, В.К. Моисеев, А.А. Шаров, О.В. Ломовской, А.Н. Плотников

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

Проведены теоретические исследования процесса штамповки листовых деталей эластомером в условиях стеснённого изгиба. Разработаны методики определения рабочего давления эластомера и необходимого превышения борта для реализации стеснённого изгиба полиуретаном в контейнере с замкнутым объёмом. Разработанная методика показала хорошее соответствие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: стеснённый изгиб, эластичная среда, листовая заготовка, контейнер с замкнутым объёмом.

Стеснённый изгиб листовых заготовок эластичной средой, как отмечалось в работе [1], обеспечивает повышение показателей качества деталей летательных аппаратов при незначительном усложнении технологической оснастки. При этом процесс штамповки осуществляется в два этапа, как представлено на рис. 1.

На первом переходе (рис. 1, а) заготовка 1 изгибается по гибочной оправке 2 под действием давления эластомера 3, заключенного в контейнер. Затем под торец борта заготовки 4 (рис. 1, б) устанавливается опорная пластина 5 для создания определённого зазора ΔH между верхней плоскостью гибочной оправки и стенкой заготовки (рис. 1, б, слева). Для предотвращения потери устойчивости изогнутого борта заготовки 4 на опорную пластину 5 ставятся эластичные подпоры 6, затем осуществляется второй переход штамповки. Под действием давления эластомера стенка заготовки вначале прогибается в центральной части, а затем образуется волна избыточного материала в зоне скругления гибочной оправки с радиусом r_0 (см. рис. 1, б, справа).

При дальнейшем увеличении давления элас-

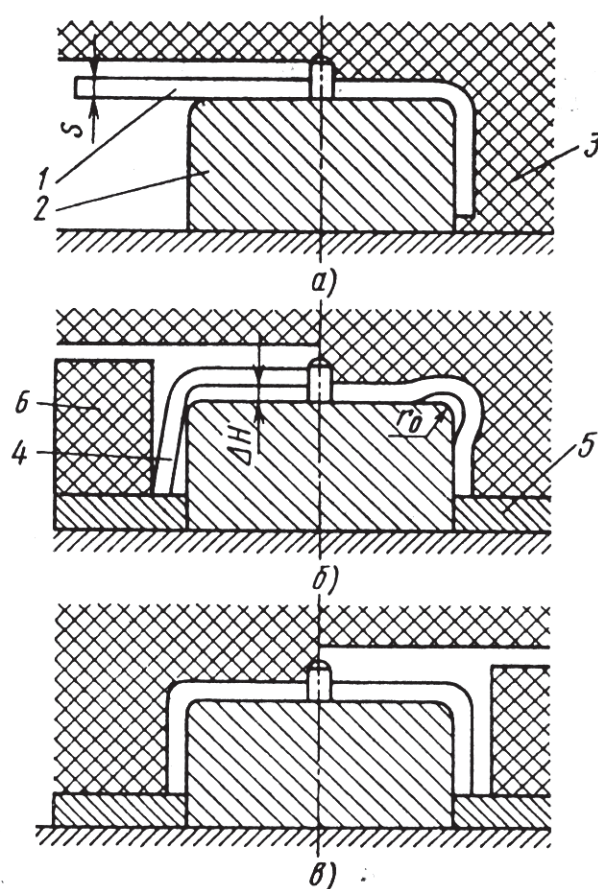


Рис. 1. Последовательность штамповки деталей стеснённым изгибом

томера волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки (рис. 1, в). В результате толщина заготовки в зоне радиусагиба увеличивается, а пружинение борта уменьшается за счёт изменения схемы напряжённо-деформированного состояния материала.

Основные параметры технологического процесса стеснённого изгиба листовых заготовок эластичной средой, а именно рабочее давление эластомера и необходимое превышение борта

Кулаков Виктор Геннадьевич, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Моисеев Виктор Кузьмич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: moiseevvk@mail.ru

Шаров Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: aa.scharov@yandex.ru

Ломовской Олег Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru

Плотников Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

ΔH , в работе [1] определяются на основе формулы Лапласа. Реальные параметры деталей, когда внутренний радиус изгиба равен примерно трём толщинам материала, не соответствуют параметрам тонкостенности оболочки. В связи с этим предлагается рассмотрение процесса пластической осадки радиусной зоны детали на основе решения задачи обжима толстостенной трубы внешним давлением.

Для согласования напряжённно-деформированного состояния материала в зоне пластического деформирования с заданными силовыми и геометрическими параметрам процесса стеснённого изгиба при штамповке эластомером получено решение краевой упругопластической задачи осадки цилиндрической волны материала детали в процессе выполнения окончательной операции штамповки эластомером методом стеснённого изгиба.

При построении аналитической математической модели процесса деформирования детали использовался тот факт, что характерные размеры толщины и радиусагиба заготовки являются величинами малыми по сравнению с характерными размерами контура формируемой детали в плане – длины дуги и радиуса кривизны. Кроме того, учитывая симметрию очага деформации, можно рассмотреть его, как трубу, осаживаемую гидростатическим давлением [2].

Моделирование, таким образом, заключается в решении краевой задачи пластического деформирования трубы с исчезновением упругой зоны под действием равномерного внешнего давления.

Решения подобных задач широко представлены в литературных источниках [3, 4].

Расчётная схема исследования напряжённно-деформированного состояния радиусного участка борта детали при штамповке эластомером методом стеснённого изгиба представлена на рис. 2.

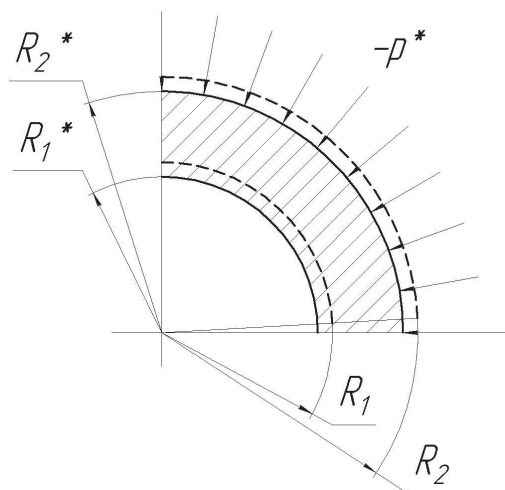


Рис. 2. Расчётная схема исследования деформированного состояния радиусного участка борта детали

Влияние анизотропии материала не учитывается, поскольку борта детали в общем случае расположены под разными углами относительно направления прокатки листа.

При пластической осадке волны материала детали на завершающей стадии процесса окончательной операции штамповки предполагается, что материал штампуемой детали находится в предельном состоянии. Также предполагается наличие условия жёсткого защемления на торцах данной волны ($\varepsilon_z=0$), иными словами, исследуемая зона пластического деформирования находится в плоском деформированном состоянии. При этом справедливо [3] уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\varphi - \sigma_\rho}{\rho} = 0, \quad R_1^* \leq \rho \leq R_2^*, \quad (1)$$

где R_1^* – радиус гибочной оправки.

Условие пластичности Genki для плоского деформированного состояния имеет вид:

$$\sigma_\rho - \sigma_\varphi = (2/\sqrt{3})\sigma_s. \quad (2)$$

При подстановке (2) в (1) получается дифференциальное уравнение, результатом интегрирования которого являются решения для радиальных и тангенциальных напряжений.

С учётом граничных условий о равенстве радиальных напряжений на поверхности давлению эластомера можно получить формулу для определения контактного давления на внешней поверхности заготовки.

Для удобства последующих выкладок и проведения анализа разработанной модели, а также удобства её практического применения целесообразно ввести безразмерные параметры процесса стеснённого изгиба при штамповке эластомером:

$$a = \frac{2 \Delta H_1}{\pi R_1^*}, \quad \nu = \frac{s}{R_1^*}, \quad \bar{\sigma}_s = \sigma_s \frac{1+\mu}{E}, \quad (3)$$

где ΔH_1 – величина припуска, затрачиваемого на осадку криволинейного участка борта детали.

В разработанной модели упрочнение материала детали в процессе пластического деформирования учтено с помощью степенной аппроксимации:

$$\sigma_s = k \left[\frac{2a + \nu}{2(1+a)} \right]^n. \quad (4)$$

С учётом принятых обозначений выражения для определения утолщения материала детали в радиусной зоне её борта δ , и для определения давления эластомера p^* получены в виде:

$$\delta = \frac{\sqrt{1 + 2v + v^2 + 2av} - 1}{v}, \quad (5)$$

$$p^* = \frac{k}{\sqrt{3}} \left(\frac{2a + v}{2(1 + a)} \right)^n \ln[1 + 2v + v^2 + 2av]. \quad (6)$$

Полученные выражения (5, 6), связывающие геометрические и силовые параметры процесса штамповки эластомером методом стеснённого изгиба, позволяют учесть особенности пластического деформирования детали только в радиусной зоне борта. Но гнутая деталь имеет такие конструктивные элементы как стенку и борт, которые воспринимают деформирующие нагрузки в процессе штамповки. Эти элементы деталей подвержены силам трения, возникающим на поверхностях контакта технологической оснастки, детали и эластомера.

Для более полного приближения разрабатываемой модели к реальному процессу штамповки приняты следующие дополнительные допущения.

Предполагается, что стенка детали не деформируется в процессе выполнения второй операции штамповки эластомером методом стеснённого изгиба. Это объясняется тем, что вследствие конструктивных особенностей контейнера с эластомером на начальном этапе второй операции штамповки стенка детали соприкасается с верхней поверхностью формблока под действием давления эластомера. В дальнейшем, в процессе операции это давление возрастает, и оно практически является нормальным по отношению к поверхности стенки детали. При этом возникают значительные усилия трения на поверхности контакта формблока и стенки детали и на поверхности контакта стенки детали и эластомера, которые препятствуют развитию пластических деформаций в стенке детали.

Также предполагается, что в процессе второй операции происходит пластическая осадка плоской части борта детали только под действием нормальной торцевой нагрузки, передаваемой от радиусного участка борта детали σ_φ . Силы трения на поверхности контакта формблока со стенкой детали и на поверхности контакта стенки детали с эластомером приблизительно равны и направлены в противоположные стороны. Вследствие этого они компенсируют друг друга, и предполагается, что борт осаживается без воздействия указанных сил трения.

Высота плоской части борта детали h^* принимается равной высоте плоской части формблока на второй операции штамповки. Торцевое давление с учётом малости толщины материала детали s принимается равным усреднённому напряжению:

$$\overline{\sigma_\varphi} = \frac{1}{s} \int_{R_1^*}^{R_1^* + s} \sigma_\varphi(\rho) d\rho.$$

Величина осадки плоской части борта ΔH_2 вследствие пластического деформирования:

$$\Delta H_2 = h^* \varepsilon_s^*.$$

Величина деформации ε_s^* , соответствует давлению $\overline{\sigma_\varphi}$ на диаграмме деформирования материала детали.

Произведя необходимые преобразования, можно получить выражение для величины припуска борта ΔH с учётом пластического деформирования плоской части борта в процессе штамповки эластомером методом стеснённого изгиба:

$$\Delta H \approx 2 \frac{1 + \lambda R_1^* / H}{1 + 2\lambda R_1^* / H} \Delta H_1, \quad (7)$$

где H - высота борта детали. Параметр λ определяется выражением:

$$\lambda = \left[2 \frac{v+1}{v} \ln(1+v) \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (8)$$

Графические зависимости утолщения материала детали в радиусной зоне её борта δ и давления эластомера p^* процесса штамповки эластомером методом стеснённого изгиба представлены на рис. 3 и 4.

Для более детального анализа разработанной модели получены решения поставленной краевой задачи с изменёнными граничными условиями, а именно рассмотрена пластическая осадка зоны деформирования заготовки со свободными торцами (плоское напряженное состояние).

Поскольку напряженное состояние является плоским ($\sigma_z = 0$), то для решения используется метод Надаи [5], причём предполагает следу-

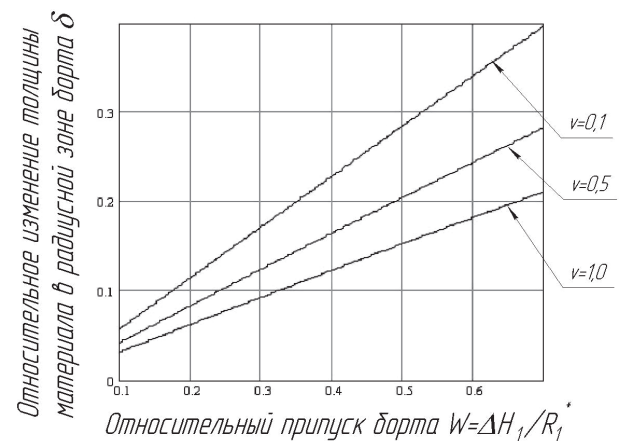


Рис. 3. Зависимость изменения толщины материала заготовки в радиусной зоне борта от относительного припуска борта при штамповке эластомером методом стеснённого изгиба

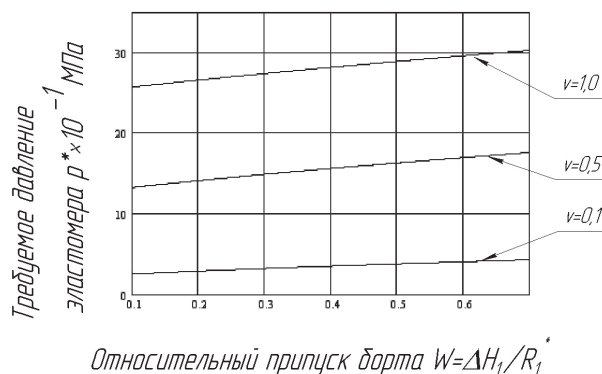


Рис. 4. Зависимость требуемого давления стесненного изгиба от относительного припуска борта для материала Д16АМ

ющие допущения из симметрии нагружения следует, что напряжения, деформации и перемещения зависят только от радиуса.

Для рассматриваемого случая дифференциальное уравнение равновесия радиусной зоны заготовки аналогично выражению (1). В уравнение (1) входят два неизвестных. Поэтому задача определения напряжений в исследуемой области является статически неопределимой. Для её решения необходимо рассмотреть деформации.

Тангенциальная ε_r и радиальная ε_φ деформации связаны с радиальным перемещением точки u и радиусом ρ следующими соотношениями:

$$\varepsilon_\varphi = u/\rho; \quad \varepsilon_\rho = du/d\rho. \quad (9)$$

Из первого уравнения (9) $u = \rho\varepsilon_\varphi$, следовательно

$$\frac{du}{d\rho} = \rho \frac{d\varepsilon_\varphi}{d\rho} + \varepsilon_\rho. \quad (10)$$

Сопоставляя полученный результат и второе выражение (9), можно получить условие совместности деформаций:

$$\rho \frac{d\varepsilon_\rho}{d\rho} + \varepsilon_\varphi - \varepsilon_\rho = 0. \quad (11)$$

Зависимости компонентов деформаций от напряжений для рассматриваемой задачи по теории упругопластических деформаций имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{2\varepsilon_i}{3\sigma_i} (\sigma_\rho - \sigma_0) \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{2\varepsilon_i}{3\sigma_i} (\sigma_\varphi - \sigma_0) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где σ_0 – среднее нормальное напряжение.

В рассматриваемом случае плосконапряжённого состояния деформированной области осевые напряжения равны нулю, поэтому выражения

интенсивности напряжений и среднего нормального напряжения примут вид:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_\rho^2 + \sigma_\varphi^2 + \sigma_\rho^2)}; \quad (13)$$

$$\sigma_0 = (\sigma_\rho + \sigma_\varphi)/3. \quad (14)$$

Из условия симметрии нагружения относительно оси осаживаемой волны следует, что пластическая область в поперечном сечении представляет собой часть осесимметричной оболочки. Если обозначить радиус границы, разделяющей упругую и пластическую области, через ρ_s , то очевидно, что величина ρ_s характеризует степень распространения пластических деформаций по толщине. Вследствие осевой симметрии нагружения в упруго-пластическом состоянии напряжения, деформации и перемещения являются функциями двух величин ρ и ρ_s .

Напряжения в пластической области должны удовлетворять дифференциальному уравнению равновесия (11) и условию пластичности Хубера-Мизеса, которое с учетом соотношения (13) имеет вид:

$$\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho \sigma_\varphi + \sigma_\varphi^2 = \sigma_s^2. \quad (15)$$

Согласно методу решения Надаи для подобных задач необходимо ввести функцию Q , через которую радиальное и тангенциальное напряжения в пластической области выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cos \Theta \\ \sigma_t &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cos(\Theta - \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Решая совместно полученные выражения и используя граничные условия соответствующие переходу всего объема материала радиусной зоны детали в пластическое состояние можно получить

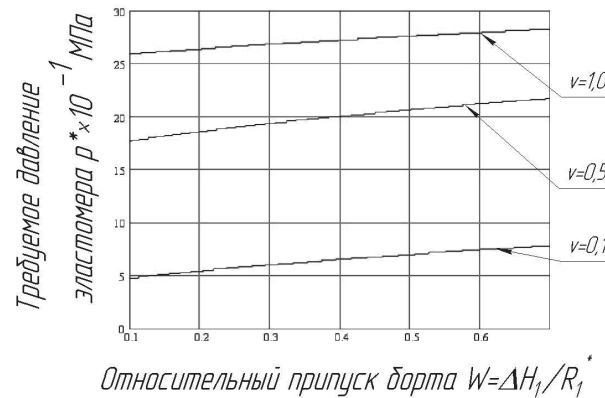


Рис. 5. Зависимость давления стеснённого изгиба от относительного припуска борта для материала Д16АМ

необходимое для реализации процесса стеснённого изгиба давление эластомера при осадке путём подстановки найденного значения Θ_2 в первое соотношение (12):

$$p^* = (2/\sqrt{3})\sigma_s \cos(\Theta_2 - \pi/6). \quad (17)$$

С использованием безразмерных параметров процесса стеснённого изгиба при штамповке эластомером (3) уравнение (17) после преобразований имеет следующий вид:

$$p^* = \frac{2}{\sqrt{3}}k \left(\frac{2a + \nu}{2(1 + a)} \right)^n \cos \left(\frac{7\pi}{6} - \Theta_2 \right). \quad (18)$$

Значение Q_2 определяется в результате численного решения трансцендентного уравнения, которое с учётом (17) представлено в следующем виде:

$$\sin \Theta_2 e^{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}} - \sqrt{3}\Theta_2 \right)} = \frac{\sqrt{3}}{2(1 + 2\nu + \nu^2 + 2a\nu)}, \quad (19)$$

причём значение Q_2 определено на интервале от $\frac{2\pi}{3}$ до π .

Утолщение материала детали в радиусной зоне может быть определено из выражения (5).

Выражение (7), для рассматриваемого случая принимает вид:

$$\Delta H \approx (2\Delta H_1 + s/2)(1 - R_1^*/H). \quad (20)$$

С помощью уравнения (18) построены графические зависимости давления эластомера p^* штамповки методом стеснённого изгиба (рис. 5).

В работе [6] приведены в частности результаты экспериментальных исследований стеснённого изгиба листовых деталей полиуретаном. Установлено, что для детали из материала Д16АМ толщиной 1мм с внутренним радиусомгиба $R_1 = 3\text{мм}$ и величиной превышения борта 0,7мм величина давления, при котором происходит образование волны избыточного материала на первой стадии процесса (рис. 1) составило

2,5МПа, а окончание процесса посадки волны произошло при давлении 127 МПа.

Согласно полученным графикам для таких параметров деталей требуемое рабочее давление в соответствии с рис. 4 составляет примерно 110 МПа, а с рис. 5 около 135 МПа.

Сравнивая полученные теоретические и экспериментальные величины давления эластомера, можно сделать вывод, что расчётная формула (15), полученная исходя из условия плосконапряжённого состояния материала заготовки, даёт более точное соответствие с экспериментальной величиной давления эластомера, создаваемого при штамповке детали со стеснённым изгибом.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета рабочего давления полиуретана, учитывающая утолщение и упрочнение материала в процессе формообразования, для штамповки бортов листовых деталей стеснённым изгибом.
2. Сравнительный анализ теоретических расчётов и экспериментальных данных подтвердил адекватность разработанной методики расчёта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование процесса стеснённого изгиба листовых заготовок эластичной средой / А.А. Шаров, В.А. Барвинок, А.Д. Комаров, и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. №4(2). С.531-536.
2. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.П. Самохвалов, Ю.В. Федотов. М.: Наука и технологии, 2002. 394 с.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с
4. Расчёты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев, В.М., и др. [под ред. С.Д. Пономарева]. 2 Т. М: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1958. Т. 2. 974 с.

5. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 428 с.
6. Исследование пружинения прямолинейных бортов при стесненном изгибе листовых заготовок эластичной средой / *А.Д. Комаров, В.А. Барвинок, А.А. Шаров, В.К. Моисеев* // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 12. С. 3-9.

CONSTRAINED BENDING IN COLD SHEET STAMPING ELASTOMER

© 2013 V.G. Kulakov, V.K. Moiseev, A. A. Sharov, O.V. Lomovskoy, A.N. Plotnikov

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

Theoretical investigation of the process of stamping of sheet items elastomer in the conditions of constrained bending. The methods of determination of the working pressure of the elastomer and necessary pre-raising Board for the implementation of restrained bending polyurethane in the container closed volume. The developed technique showed a good agreement with experimental data.

Keywords: tight bending of elastic environment plate stock, the container closed volume.

Viktor Kulakov, Graduate Student at the Manufacture of Aircraft and Management of Quality in Machine Building Department

Viktor Moiseev, Doctor of Technics, Professor at the Manufacture of Aircraft and Management of Quality in Machine Building Department. E-mail: moiseevvk@mail.ru

Andrey Sharov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Manufacture of Aircraft and Management of Quality in Machine Building Department. E-mail: aa.scharov@yandex.ru

Oleg Lomovskoy, Candidate of Technics, Associate Professor at the Manufacture of Aircraft and Management of Quality in Machine Building Department. E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru

Andrey Plotnikov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Manufacture of Aircraft and Management of Quality in Machine Building Department.