

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКОВ НА СТЕСНЁННЫЙ ИЗГИБ ЭЛАСТОМЕРОМ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2020

- В. К. Моисеев** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; moiseevvk@mail.ru
- Е. Г. Громова** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; pla.gromova@ya.ru
- О. В. Ломовской** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; oleg.lomovskoi@ya.ru
- М. Н. Мантусов** ведущий инженер; Ульяновский филиал КБ «ПАО Туполев», г. Ульяновск; mishaufkb@ya.ru
- А. Н. Плотников** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; anplotnikov@ya.ru
- А. А. Шаров** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aa.sharov@ya.ru

Представлен метод стеснённого изгиба листовых деталей летательных аппаратов с криволинейными бортами эластичной средой. Описан процесс проведения стеснённого изгиба. Изготовление детали осуществляется за два перехода. В результате первого перехода получается деталь с утонением в радиусной части. Второй переход проводят на формблоке сниженной высоты, в результате полученная волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки. В готовой детали наблюдается увеличение толщины заготовки в зоне радиусагиба. Волна избыточного материала образуется за счёт специального припуска, величина которого является определяющей для достижения увеличения толщины. Аналитическая модель определения припуска базируется на общепринятых допущениях и принципах расчёта технологических параметров. Для определения припуска предлагается аппроксимация формы избыточной волны тангенциальной функцией. Это позволяет получить аналитическую зависимость, связывающую геометрию детали и утолщение стенки с величиной припуска. Величина припуска ограничивается некоторым диапазоном, нижняя граница которого определена из условия начала пластических деформаций, верхняя – из условия возможности потери устойчивости, приводящей к неисправимому браку. Результаты проиллюстрированы графиками зависимости величины минимального и максимального припуска высоты борта от соотношений толщины стенки заготовки, радиусагиба борта и радиуса борта в плане. Графические и аналитические зависимости представлены в безразмерном виде, где геометрические параметры отнесены к радиусу гибочного инструмента, то есть к радиусугиба борта детали по внутренней поверхности.

Технология производства летательных аппаратов; штамповка эластомером; стеснённый изгиб; деформации; припуск

Цитирование: Моисеев В.К., Громова Е.Г., Ломовской О.В., Мантусов М.Н., Плотников А.Н., Шаров А.А. Аналитическая модель определения припусков на стеснённый изгиб эластомером деталей летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 3. С. 73-84. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84

Введение

В конструкции летательных аппаратов имеется большое множество тонкостенных деталей, изготавливаемых из листовых полуфабрикатов гибкой. При этом борт детали может быть прямолинейным либо криволинейным в плане. Гибка бортов таких деталей осуществляется преимущественно эластомерами и сопровождается нежелательным утонением стенки на радиусегиба. Утонение регламентируется соображениями равнопрочности и оговаривается в технических условиях на конструкцию детали. Для выполнения задаваемых конструктором условий, а именно для уменьшения величины утонения, предложен технологический процесс штамповки деталей эластичным инструментом со стеснённым изгибом, защищённый патентом, а также разработаны различные схемы его реализации. Результаты проведённых исследований позволяют рассчитывать параметры и проектировать техпроцесс и технологическое оснащение для стеснённого изгиба прямолинейных бортов, тогда как по штамповке криволинейных бортов проведены лишь экспериментальные исследования и проведена единичная промышленная апробация [1-4].

Общая постановка задачи

Схема технологического процесса стеснённого изгиба при штамповке эластомером представлена на рис. 1. На нём условно изображена последовательность реализации стеснённого изгиба эластомером деталей, имеющих уголгиба 90° . Стеснённый изгиб по этой схеме производится за два перехода. Вначале (рис. 1, а) заготовка 1 изгибается по гибочной оправке 2 под действием давления эластичной среды 3, заключённой в контейнер (условно не показан). Затем под торец изогнутого борта заготовки 4 (рис. 1, б) устанавливается опорная пластина 5 для создания определённого припуска борта ΔH по его высоте 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. Под действием давления эластичной среды стенка заготовки вначале прогибается в центральной части, а затем образуется волна избыточного материала в зоне скругления гибочной оправки с радиусом r_0 (рис. 1, б, справа). При дальнейшем увеличении давления эластичной среды 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 деформирования заготовки.

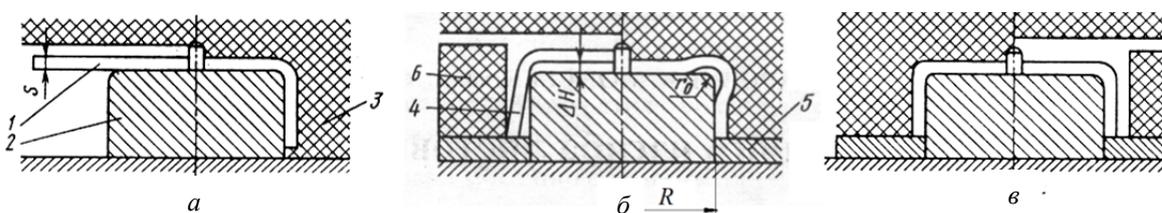


Рис. 1. Схема технологического процесса стеснённого изгиба при штамповке эластомером:
 а – предварительная гибка; б – начало операции окончательной гибки;
 в – завершение операции окончательной гибки

Кроме того, появляется возможность уменьшения радиуса изгиба, что также является актуальной задачей, так как при этом повышается жёсткость деталей и снижается их масса в результате уменьшения необходимой для крепления детали высоты борта, например, в клёпаных конструкциях сборочных единиц самолётов.

Технологическим параметром, обеспечивающим реализацию стеснённого изгиба, является припуск высоты борта полуфабриката, величина которого определяет возможность использования такой технологии в конкретном случае и толщину стенки в зоне радиусагиба. Для назначения размера припуска требуется создание аналитической модели, позволяющей провести расчёт оптимального диапазона возможных припусков для последующего окончательного его выбора при проектировании конкретного технологического процесса.

Основная часть

В случае криволинейного в плане борта детали полуфабрикат перед последней стадией формовки имеет вид обечайки с донцем с торовым скруглением на стенке в зоне кромки оправки-формблока (рис. 2). Для расчёта необходимого припуска на втором переходе вышеописанного процесса штамповки можно выделить две стадии:

- 1) посадка заготовки на поверхность формблока с образованием волны избыточного материала над кромкой последнего;
- 2) осадка волны на кромку формблока.

В холодной листовой штамповке принято рассчитывать размеры заготовок, исходя из равенства площадей поверхности заготовки и детали. Для расчёта исходной площади полуфабриката его поверхность следует рассмотреть как состоящую из трёх сегментов:

– донце

$$S_1 = \pi(R - r_1)^2, \tag{1}$$

– обечайка

$$S_2 = 2\pi R(H + \Delta - r_1), \tag{2}$$

– торовый сегмент (скругление)

$$S_3 = 2\pi r_1 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [R - r_1(1 - \cos \varphi)] d\varphi = \pi^2 r_1 (R - r_1) + 2\pi r_1^2. \tag{3}$$

Здесь R – радиус кривизны борта в плане; Δ – припуск высоты борта; r_1 – радиус скругления борта заготовки после первого перехода (рис. 2, а).

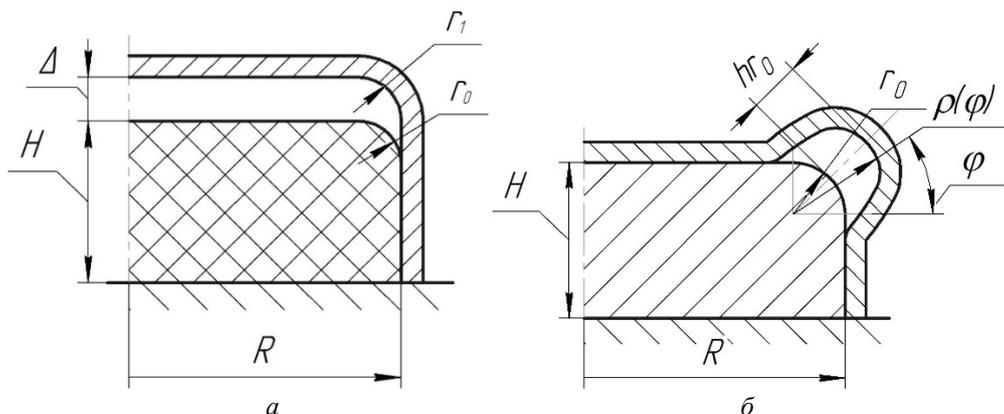


Рис. 2. Параметры геометрии полуфабриката на промежуточных стадиях штамповки: а – после первого перехода; б – перед окончательной штамповкой

Суммируя выражения (1) – (3), получим полную площадь поверхности заготовки

$$S_0 = \pi(R - r_1)^2 + 2\pi R(H + \Delta - r_1) + \pi^2 r_1(R - r_1) + 2\pi r_1^2. \quad (4)$$

Площадь поверхности заготовки в начальной стадии посадки на формблок аналогично имеет три составляющих:

$$S_1 = \pi(R - r_1)^2 + 2\pi R(H - r_0) + S^*; \quad (5)$$

площадь волны избыточного материала над кромкой формблока, которая имеет вид горбоподобного сегмента (рис. 2, б), определяется соотношением

$$S^* = 2\pi r_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [R - r_0 + \rho(\varphi) \cos \varphi] \sqrt{\rho^2(\varphi) + \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2} d\varphi. \quad (6)$$

Профиль поперечного сечения этой волны из условия гладкого примыкания её ветвей к донцу и борту на основании результатов экспериментов и с достаточной для практики степенью точности может быть аппроксимирован зависимостью

$$\rho(\varphi) = r_0 \left[1 + h \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \right], \quad (7)$$

где r_0 – радиус скругления кромки формблока; h – высота волны в долях r_0 (рис. 2, б).

Подставляя аппроксимирующую функцию (7) в подкоренное выражение зависимости (6) и разлагая полученную дробно-степенную функцию в ряд по степени h ($h < 1$), получим

$$\begin{aligned} S^*(h) = & 2\pi r_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [R - r_0 + \rho(\varphi) \cos \varphi] \times \\ & \times \left\{ 1 + h \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) + 8h^2 \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) - \right. \\ & \left. - 8h^3 \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \right\} d\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

После группирования подынтегрального выражения (8) по степеням h и сведения ряда к виду $a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3$ последовательно получаются следующие зависимости:

$$a_0 = R - r_0 (1 - \cos \varphi),$$

$$a_1 = (R - r_0) \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) + 2r_0 \cos \varphi \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right),$$

$$a_2 = 8[R - r_0(1 - \cos \varphi)] \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) + r_0 \cos \varphi \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right),$$

$$a_3 = -8 \left[[R - r_0(1 - \cos \varphi)] \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) - \right. \\ \left. - r_0 \cos \varphi \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \right] = -8(R - r_0) \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right).$$

Таким образом, формулу (8) можно представить в виде

$$S^*(h) = 2\pi r_0 (A_0 + A_1 h + A_2 h^2 + A_3 h^3), \quad (9)$$

где коэффициенты A_0, A_1, A_2 и A_3 имеют вид

$$A_0 = (R - r_0)I_0 + r_0I_1,$$

$$A_1 = (R - r_0)I_2 + 2r_0I_3,$$

$$A_2 = 8(R - r_0)I_4 + r_0(8I_5 + I_6),$$

$$A_3 = -8(R - r_0)I_7.$$

Здесь коэффициенты $I_i (i = \overline{1, 7})$ являются тригонометрическими интегралами, которые имеют следующие значения:

$$I_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi = \frac{\pi}{2},$$

$$I_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi d\varphi = 1$$

$$I_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{\pi}{4},$$

$$I_3 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\varphi) \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{8}{15},$$

$$I_4 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{\pi}{16},$$

$$I_5 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\varphi) \cos^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{8}{63},$$

$$I_6 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{128}{315},$$

$$I_7 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^4 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) \sin^2 \left(2 \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right) d\varphi = \frac{\pi}{32}.$$

Таким образом, коэффициенты A_0, A_1, A_2, A_3 примут вид

$$A_0 = \frac{\pi}{2}(R - r_0) + r_0,$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}(R - r_0) + \frac{16}{15}r_0,$$

$$A_2 = \frac{\pi}{2}(R - r_0) + \frac{448}{315}r_0,$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4}(R - r_0).$$

После подстановки A_0, A_1, A_2, A_3 выражение (9) примет вид

$$S^*(h) = 2\pi r_0 \left\{ \frac{\pi}{2}R - \frac{\pi - 2}{2}r_0 + \left(\frac{\pi}{4}R + \frac{64 - 15\pi}{60}r_0 \right)h + \left(\frac{\pi}{2}R + \frac{448}{315}r_0 \right)h^2 - \frac{\pi}{4}(R - r_0)h^3 \right\}. \quad (10)$$

Далее, подставляя зависимость (10) в выражение (5) и приравнявая результат к начальной площади (4), после преобразований получаем окончательное выражение для припуска высоты борта полуфабриката:

$$\Delta = r_0(\alpha - 1) \left[2 - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi - 1}{2}\beta(\alpha + 1) \right] + r_0h \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{64 - 15\pi}{60}\beta + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{64}{45}\beta \right)h - \frac{\pi}{4}(1 - \beta)h^2 \right\}, \quad (11)$$

где

$$\alpha = \frac{r_1}{r_0} \geq 1, \quad \beta = \frac{r_0}{R} < 1.$$

Величину припуска высоты борта полуфабриката необходимо ограничить некоторым диапазоном, имеющим верхнюю и нижнюю границы. Верхнюю границу припуска (11) следует определить из условия сохранения устойчивости волны избыточного материала при её осадке (обжиге) на кромку формблока, чтобы не допустить её переход в складку. В качестве критерия потери устойчивости предлагается принять равенство поперечного давления и продольного давления на волну, а конкретнее – равенство их равнодействующих Q и P , возникающих от равномерно распределённого по внешней поверхности волны нормального давления p (рис. 3).

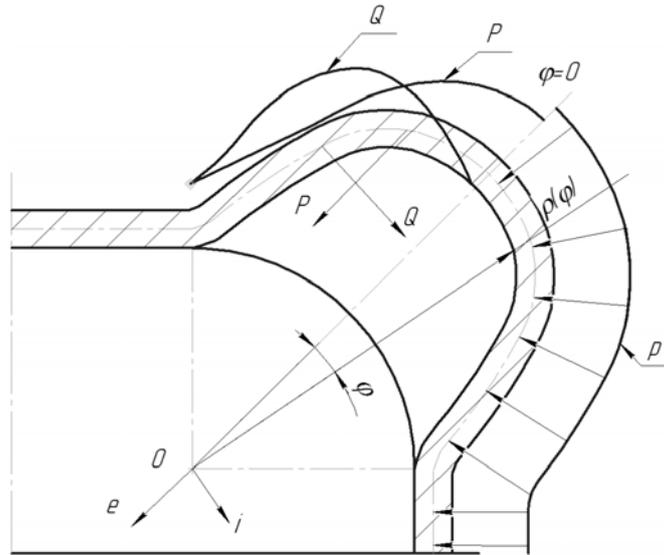


Рис. 3. Схема силового воздействия эластомера на волну избыточного материала

Величины Q и P пропорциональны суммарным проекциям равномерного нормального давления эластомера p на соответствующие взаимно перпендикулярные направления. Математически это выражается в виде интеграла скалярного произведения вектора единичной нормали к поверхности волны и соответствующей единичной орты. Последние естественным образом определяются как $\vec{e} = (1, 0)$, $\vec{i} = (0, 1)$.

Вектор единичной нормали при данной ориентации осей имеет координаты

$$\vec{n} = \left(\frac{\frac{d}{d\varphi}(\rho(\varphi)\sin(\varphi))}{\sqrt{\rho^2(\varphi) + \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2}}, -\frac{\frac{d}{d\varphi}(\rho(\varphi)\cos(\varphi))}{\sqrt{\rho^2(\varphi) + \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2}} \right). \quad (12)$$

Подставляя в выражение (12) аппроксимирующую функцию (7) со сдвигом по угловой координате $\varphi' = \varphi - \frac{\pi}{4}$, для приведённых величин $\tilde{P} = \frac{P}{r_0 p}$, $\tilde{Q} = \frac{Q}{r_0 p}$ получим их значения.

Продольный компонент давления определяется следующим образом:

$$\tilde{P} = \frac{1}{r_0} \int_0^{\frac{\pi}{4}} (\vec{n}, \vec{e}) dL \varphi = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left\{ \cos(\varphi) [1 + h \cos^2(2\varphi)] - 4h \sin(\varphi) \cos(2\varphi) \sin(2\varphi) \right\} d\varphi.$$

Аналогично поперечный компонент давления определяется как

$$\tilde{Q}(h) = \frac{1}{r_0} \int_0^{\frac{\pi}{4}} (\vec{n}, \vec{i}) dL(\varphi) = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left\{ 4h \cos(\varphi) \cos(2\varphi) \sin(2\varphi) + \sin(\varphi) [1 + h \cos^2(2\varphi)] \right\} d\varphi.$$

В результате расчётов определено:

$$\tilde{P}(h) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \tilde{Q}(h) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} + h.$$

Приравнивая полученные значения, получим верхнюю границу относительной высоты волны:

$$h_{\max} = \sqrt{2} - 1.$$

С учётом этого результата из выражения (11) следует, что верхняя граница припуска определяется как

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{\max}}{r_0} = & (\alpha - 1) \left[2 - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi - 1}{2} \beta (\alpha + 1) \right] + \\ & + (\sqrt{2} - 1) \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{64 - 15\pi}{60} \beta + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{64}{45} \beta \right) (\sqrt{2} - 1) - \frac{\pi}{4} (1 - \beta) (3 - 2\sqrt{2}) \right\}. \end{aligned}$$

Нижнюю границу припуска Δ_{\min} можно определить из решения деформационной краевой задачи теории пластичности. В качестве схемы очага деформации для упрощения задачи допустимо принять вершину волны избыточного материала за цилиндрический сегмент, т.е. представить его в виде толстостенной трубы, осаживаемой опоясывающим давлением на стержневую оправку радиуса r_0 при наличии однородного осевого сжатия. Деформированное состояние в очаге деформации будет определяться тремя главными компонентами $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z$. Радиальный и окружной компоненты зависят только от радиальной координаты и связаны уравнением неразрывности:

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_\varphi(\rho) + \rho \frac{d\varepsilon_\varphi(\rho)}{d\rho}. \quad (13)$$

Осевой компонент с точностью до малой порядка S/R , где S – толщина заготовки, равен

$$\varepsilon_z = -h\beta. \quad (14)$$

Вторым уравнением служит условие несжимаемости:

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_z = 0. \quad (15)$$

Граничным условием логично считать контакт заготовки с кромкой формблока в конце процесса посадки волны избыточного материала, т.е. положить радиальное перемещение на внутренней поверхности волны $u(r_0(1+h)) = -r_0h$. Отсюда следует, что

$$\varepsilon_\varphi(r_0(1+h)) = \frac{u(r_0(1+h))}{r_0(1+h)} = -\frac{h}{1+h}. \quad (16)$$

Подставляя уравнение неразрывности (13) и осевой компонент деформации (14) в условие несжимаемости (15), с учётом выражения (16), получим краевую задачу Коши в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \rho \frac{d\varepsilon_\varphi(\rho)}{d\rho} + 2\varepsilon_\varphi(\rho) = \beta h, \\ \varepsilon_\varphi(r_0(1+h)) = -\frac{h}{1+h}, \end{cases}$$

где $r_0(1+h) \leq \rho \leq r_0(1+h) + s$.

В результате интегрирования получим

$$\varepsilon_\varphi(\xi) = \frac{\rho h}{2} - \frac{h(1+h)}{\xi^2} \left(1 + \frac{1+h}{2} \beta \right), \quad (17)$$

где $\xi = \frac{\rho}{r_0}$ – безразмерная координата.

Условием полного перехода волны избыточного материала в пластическое состояние является выход границы зоны пластичности на внешнюю границу очага деформации $\rho = r_0(1+h) + \xi$. Согласно критерию Губера-Мизеса в деформациях интенсивность деформаций, определяемая как

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\rho - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_z)^2}, \quad (18)$$

в пластичном состоянии при любой механической схеме напряжений-деформаций должна достигать критической величины $\varepsilon_i = \varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E}$, где σ_t и E – предел текучести и модуль упругости материала, соответственно.

Подставляя выражения (13), (14), (17) в зависимость (18) и введя обозначение $\xi = 1+h+\eta$, где $\eta = \frac{S}{r_0}$ – относительная толщина заготовки, получаем, что для внешней поверхности волны избыточного материала должно выполняться равенство

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{4 \frac{h^2(1+h)^2}{(1+h+\eta)^4} \left(1 + \frac{1+h}{2} \beta \right)^2 + \left[\frac{3}{2} \beta h + \frac{h(1+h)}{(1+h+\eta)^2} \left(1 + \frac{1+h}{2} \beta \right) \right]^2 + \left[\frac{3}{2} \beta h - \frac{h(1+h)}{(1+h+\eta)^2} \left(1 + \frac{1+h}{2} \beta \right) \right]^2}.$$

Возводя обе части последнего соотношения в квадрат, после упрощающих преобразований получаем выражение для нижней границы h в виде неявной зависимости:

$$\frac{h^2(1+h)^2}{(1+h+\eta)^4} \left(1 + \frac{1+h}{2} \beta \right)^2 + \frac{3}{4} h^2 \beta^2 = \frac{3}{4} \frac{\sigma_t^2}{E^2}. \quad (19)$$

Пренебрегая членами, порядок малости которых выше β , сведём зависимость (19) к квадратному уравнению, решением которого является явное выражение для минимального значения h_{\min} , при котором волна избыточного материала в полном объёме перейдёт в пластическое состояние

$$h_{\min} \approx \frac{\sqrt{\left((1+\eta)\lambda - \frac{1}{4}\beta \right)^2 + (1+\eta)^2 \lambda(1+\lambda) - (1+\eta)\lambda + \frac{1}{4}\beta}}{1+\lambda}, \quad (20)$$

где $\lambda = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_t}{E} \ll 1$. После упрощающих преобразований выражение (20) для нижней границы примет вид

$$h_{\min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\varepsilon_t (1+\eta)^2}{\sqrt{1+\beta} - \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_t (1+\eta)^2}.$$

Подставляя найденное значение h_{\min} в зависимость (11), получим величину минимального припуска высоты борта Δ_{\min} , необходимую для перевода в пластическое состояние волны избыточного материала.

На рис. 4 в безразмерном виде представлены величины минимального и максимального припуска высоты борта в зависимости от соотношений толщины стенки заготовки S , радиусагиба борта r_0 и радиуса борта в плане R .

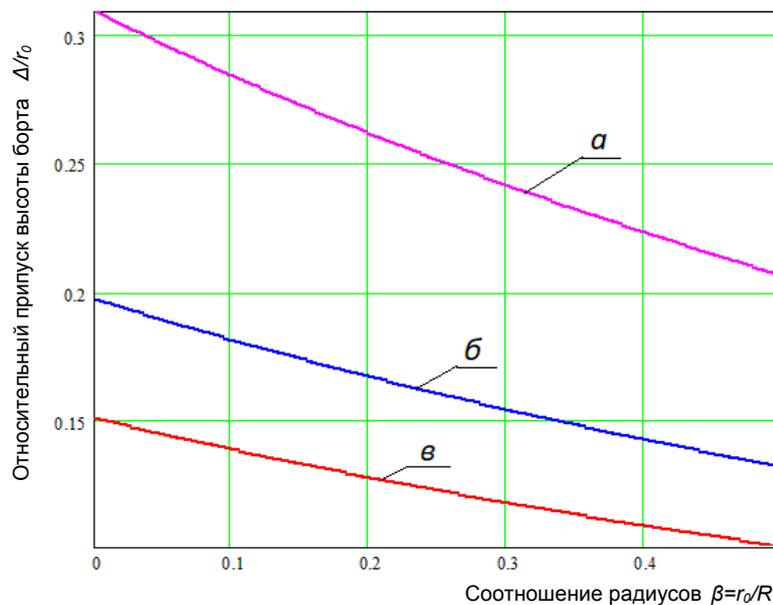


Рис. 4. Зависимости припусков высоты борта от геометрических параметров детали:
 а – максимально возможный припуск Δ_{\max}/r_0 ;
 б – минимально возможный припуск $100(\Delta_{\min}/r_0)$ при $\eta = S/r_0 = 0,5$;
 в – минимально возможный припуск $100(\Delta_{\min}/r_0)$ при $\eta = S/r_0 = 0,05$

Из графиков на рис. 4 следует, что припуски находятся в обратной зависимости от кривизны детали в плане. Практические значения припусков высоты борта, например для деталей из алюминиевых сплавов, когда обычно принимается $r_0 = 3S$, составляют величины порядка 0,5...0,9 толщины стенки заготовки.

Заключение

В результате исследований разработанной перспективной технологии стеснённого изгиба листовых деталей летательных аппаратов с криволинейными бортами эластичной средой получена аналитическая модель определения припуска, связывающая геометрию детали и утолщение стенки заготовки с величиной припуска. Величина припуска ограничивается некоторым диапазоном, нижняя граница которого определена из условия начала пластических деформаций, верхняя – из условия возможности потери устойчивости, приводящей к неисправимому браку. Выяснено, что величина припуска находится в обратной зависимости от кривизны детали в плане. Для наиболее распространённых в авиационной и ракетно-космической технике конструкций деталей припуски составляют величины порядка 0,5...0,9 толщины стенки заготовки.

Библиографический список

1. Моисеев В.К., Мантусов М.Н., Плотников А.Н., Ломовской О.В., Шаров А.А. Совершенствование технологии гибки криволинейных бортов деталей самолётов // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 4 (3). С. 441-444.
2. Мантусов М.Н., Моисеев В.К., Шаров А.А., Громова Е.Г., Рыжаков С.Г. Штамповка листовых деталей с криволинейными бортами эластичным материалом // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 4 (3). С. 332-336.
3. Гречников Ф.В., Моисеев В.К., Ломовской О.В., Шаров А.А., Мантусов М.Н. Штамповка с тангенциальным сжатием высокоточных листовых деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 7. С. 3-9.
4. Moiseyev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Mantusov M.N. Results of the sheet parts curved edges constrained bending with elastomer // Key Engineering Materials. 2017. V. 746. P. 285-289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.746.285

ANALYTICAL MODEL FOR DETERMINING ALLOWANCES FOR ELASTOMER CONSTRAINED BENDING OF AIRCRAFT PARTS

© 2020

- | | |
|------------------------|---|
| V. K. Moiseev | Doctor of Science (Engineering), Professor; Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; moiseevvk@mail.ru |
| E. G. Gromova | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; pla.gromova@ya.ru |
| O. V. Lomovskoi | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; oleg.lomovskoi@ya.ru |
| M. N. Mantusov | Leading Engineer; Ulyanovsk branch of Tupolev Design Bureau, Ulyanovsk, Russian Federation; mishaufkb@ya.ru |
| A. N. Plotnikov | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; anplotnikov@ya.ru |
| A. A. Sharov | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aa.sharov@ya.ru |

In the article, the authors present a method of constrained bending of aircraft sheet parts with curved sides by an elastic medium. The process of conducting constrained bending is described. A schematic description of the process is presented. The manufacture of a part is carried out in two steps. As a result of the first step, a piece is obtained with thinning in the radius part, the second step is accomplished with a unit die of reduced height. The resulting wave of excess material is deformed along the radius of the bending mandrel. In the finished part, an increase in the thickness of the workpiece is observed in the zone of the bending radius. The wave of excess material is formed due to a special allowance, the size of which is the critical factor for achieving this increase in thickness. The analytical model for determining the allowance is based on generally accepted assumptions and principles for calculating process parameters. To determine the allowance, an approximation of the shape of the excess wave by a tangential function is proposed. This allows you to get an analytical dependence that relates the geometry of the part and the thickening of the wall to the size of the allowance. The size of the allowance is limited to a certain range, the lower boundary of which is determined by the onset of plastic deformations, the upper one - by the possibility of loss of stability, leading to irreparable spoilage. The results are illustrated by graphs of the dependence of the minimum and maximum allowance for the side height on the ratios of the workpiece wall thickness, the radius of the side bending and the radius of the side in plan. Characteristic curves and analytical dependencies are presented in a dimensionless form, where the geometric parameters are assigned to the radius of the bending tool, that is, to the radius of bending of the part side on the inner surface.

Aircraft production technology; elastomer forming; constrained bending; deformations; allowance

Citation: Moiseev V.K., Gromova E.G., Lomovskoi O.V., Mantusov M.N., Plotnikov A.N., Sharov A.A. Analytical model for determining allowances for elastomer constrained bending of aircraft parts. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 3. P. 73-84. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84

References

1. Mosieev V.K., Mantusov M.N., Plotnikov A.N., Lomovskoi O.V., Sharov A.A. Improving the technology of bending curved sides of aircraft parts. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018. V. 20, no. 4 (3). P. 441-444. (In Russ.)
2. Mantusov M.N., Moiseev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Ryzhakov S.G. Stamping of sheet details with curvilinear sides by elastic material. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018. V. 20, no. 4 (3). P. 332-336. (In Russ.)
3. Grechnikov F.V., Moiseev V.K., Lomovskoy O.V., Sharov A.A., Mantusov M.N. Stamping with tangential compression of high-precision sheet metal parts. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2019. No. 7. P. 3-9. (In Russ.)
4. Moiseyev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Mantusov M.N. Results of the sheet parts curved edges constrained bending with elastomer. *Key Engineering Materials*. 2017. V. 746. P. 285-289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.746.285