

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ПРИ ОБТЯЖКЕ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2012 В.А. Барвинок<sup>1</sup>, С.Г. Дементьев<sup>2</sup>, В.П. Самохвалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> Авиастар-СП, г. Ульяновск

Поступила в редакцию 16.11.2012

В статье рассматривается технологический процесс обтяжки при изготовлении обводообразующих деталей летательных аппаратов. Анализируется влияние поперечного растяжения на пластические свойства металла. Определяется величина критических сжимающих напряжений и предельно допустимая величина деформации продольного растяжения.

Ключевые слова: процесс обтяжки, поперечное растяжение, напряжённое состояние, деформация, предельное растяжение, пластические свойства, интенсивность деформаций

Обтягивание сопровождается изгибом, значительным утонением и упрочнением материала заготовки. Возможности процесса значительно расширяются, если обтягивать предварительно изогнутые листовые заготовки.

В зависимости от схемы приложения внешних сил и формы обтягиваемой заготовки применяют простую с продольным растяжением обтяжку с большим технологическим припуском и поперечную с меньшим отходом материала и с влиянием на пластические свойства металла. Для обеспечения эксплуатационных свойств изготавливаемых деталей летательных аппаратов необходимо прогнозировать пластические свойства заготовки в начале технологического процесса изготовления обводообразующей детали. На первом этапе это возможно с применением математического аппарата.

Поперечное растяжение листовой заготовки в процессе обтяжки приводит к увеличению показателя жёсткости напряжённого состояния

$$P = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / \sigma_7, \quad (1)$$

где  $\sigma_7$  – интенсивность напряжений и влечёт за собой изменение предельной интенсивности истинной (логарифмической) деформации  $\varepsilon_{ip}$ , соответствующей моменту разрушения. Зависимость  $\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{ip}(P)$  называется диаграммой пластичности. Она строится по экспериментальным данным, но для практических целей вполне подходит предложенная Г.А. Смирновым-Аляевым аппроксимирующая функция [1]:

$$\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{ip}^3 \cdot 2e^{-0,72P}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{ip}^3$  – экспериментально определяемая величина

*Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru*  
*Дементьев Сергей Геннадьевич, Генеральный директор. E-mail: director@aviastar-sp.ru*  
*Самохвалов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

чина интенсивности истинной деформации образца, разрушаемого одноосным растяжением.

При одноосном растяжении отсутствуют поперечные напряжения, т.е.  $y_y = y_z = 0$ , а интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} = \sigma_x, \quad (3)$$

следовательно, показатель жёсткости напряжённого состояния

$$P^0 = (y_x + 0 + 0) / y_x = 1. \quad (4)$$

Поперечные деформации при одноосном растяжении равны между собой и находятся из соотношения  $\varepsilon = \varepsilon_z = -m \varepsilon_x = -0,5 \varepsilon_x$ , а интенсивность деформаций в этом случае равна

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} = \varepsilon_x, \quad (5)$$

следовательно, можно считать, что

$$\varepsilon_{ip}^3 = \varepsilon_{ин}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ин}$  – истинная деформация разрушения образца в зоне шейки.

Используя (7) выразим деформацию  $\varepsilon_{ин}$  через сужение  $\psi = (F_0 - F_k) / F_0$ :

$$\varepsilon_{ин} = \ln \left( 1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln \left( \frac{l_k}{l_0} \right) = \ln \left( \frac{F_0}{F_k} \right) = \ln \left( \frac{1}{1-\psi} \right). \quad (8)$$

Из совместного решения (2), (6), (8) имеем

$$\varepsilon_{ip}^3 = 2e^{-0,72P} \cdot \ln \left( \frac{1}{1-\psi} \right). \quad (9)$$

Экспериментально определяемые значения  $\psi$  приводятся в справочной литературе. Так, для сплава Д16 величина сужения, согласно [2], составляет  $\psi = 0,25$  (для Д16Т) и  $\psi = 0,55$  (для Д16М).

Задача об оценке влияния поперечного растяжения на пластические свойства обтягиваемой листовой заготовки будет решена, если удастся установить зависимость

$$[\varepsilon_x] = f(\sigma), \quad (10)$$

где  $[\varepsilon_x]$  – предельно допустимая деформация при обтяжке.

К числу критериев, используемых при назначении предельно допустимой деформации, могут относиться условие отсутствия разрушения, устойчивости нагружения, мелкозернистости структуры и др. В нашем случае будет использоваться критерий отсутствия разрушения.

При установлении зависимости (10) будем предполагать, что материал листовой заготовки является изотропным, т.е. его пластические свойства одинаковы в направлениях всех координатных осей:  $\sigma_{x_0} = \sigma_{y_0} = \sigma_0$ ;  $\varepsilon_{x_0} = \varepsilon_{y_0} = \varepsilon_0$ , где  $\sigma_0, \varepsilon_0$  – напряжение и деформация временного сопротивления.

Для удобства рассуждений в дальнейшем будем пользоваться безразмерными параметрами  $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_0$ , изменяющимся в пределах  $0 \leq \bar{\sigma}_y \leq 1$  и  $\bar{\varepsilon}_x = [\varepsilon_x] / \varepsilon_0$ , который может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

При  $\bar{\sigma}_y = 0$  обтягиваемая листовая заготовка будет находиться в условиях одноосного растяжения. Такому состоянию, как было установлено выше, соответствует показатель жёсткости напряжённого состояния  $\Pi=1$  и интенсивность деформация

$$[\varepsilon_x] = 2e^{-0,72} \cdot \varepsilon_0, \quad (11)$$

а безразмерный параметр  $\bar{\varepsilon}_x$  будет равен  $\bar{\varepsilon}_x = 2e^{-0,72} = 0,973 \approx 1$ .

Итак, первая точка на диаграмме  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  имеет координаты  $\bar{\varepsilon}_{x1} = 1$  и  $\bar{\sigma}_{y1} = 0$ .

Вторую точку на диаграмме  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  выберем из условия равенства нулю поперечной деформации  $\bar{\varepsilon}_{y2} = 0$ .

Постоянство объёма при  $\varepsilon_{y2} = 0$  будет сохранено, если деформация  $\varepsilon_z$  будет противоположной по знаку деформации  $\varepsilon_x$ , т.е.  $\varepsilon_z = -\varepsilon_x$ . При этом интенсивность деформации составит

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - 0)^2 + (0 - \varepsilon_x)^2 + (-\varepsilon_x - \varepsilon_x)^2} = \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_x. \end{aligned} \quad (12)$$

Интенсивность напряжений функционально связана с интенсивностью деформаций экспериментально устанавливаемым при простом растяжении образца соотношением

$$\sigma_i = K \varepsilon_i^n = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^n K \varepsilon_x^n. \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в уравнении теории пластичности получим

$$\begin{cases} \sigma_x - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} \varepsilon_x = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} K \varepsilon_x^n = \frac{1}{2} K_{\Pi} \varepsilon_x^n; \\ \sigma_y - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} \varepsilon_y = 0; \\ \sigma_z - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} \varepsilon_z = -\frac{1}{2} K_{\Pi} \varepsilon_x^n. \end{cases} \quad (14)$$

Напряжения  $\sigma_z$  при обтяжке обычно пренебрежимо малы по сравнению с  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , поэтому считаем, что  $\sigma_z = 0$ . Тогда из третьего уравнения системы (14) следует, что

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} K_{\Pi} \varepsilon_x^n. \quad (15)$$

Подставляя в первое и второе уравнения системы (14) получим  $\varepsilon_{y2} = 0$ , тогда

$$\begin{cases} \sigma_x = K_{\Pi} \varepsilon_x^n; \\ \sigma_y = \frac{1}{2} K_{\Pi} \varepsilon_x^n = \frac{1}{2} \sigma_x. \end{cases} \quad (16)$$

Интенсивность напряжений во второй точке будет равна

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left(\sigma_x - \frac{1}{2}\sigma_x\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\sigma_x - 0\right)^2 + (0 - \sigma_x)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_x, \quad (17)$$

а показатель жёсткости напряжённого состояния

$$\Pi = \frac{\sigma_x + \frac{\sigma_x}{2} + 0}{\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_x} = \sqrt{3}. \quad (18)$$

Из совместного решения (9), (12) и (18) для

$$[\varepsilon_x]_2 = \sqrt{3} e^{-0,72\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_0, \quad (19)$$

следовательно, безразмерный параметр  $\bar{\varepsilon}_x$  во второй точке примет значение

$$\bar{\varepsilon}_{x2} = \sqrt{3} e^{-0,72\sqrt{3}} = 0,494 \approx 0,5.$$

Поскольку напряжение  $\sigma_y$  составляет половину от напряжения  $\sigma_x$  (второе уравнение (16)), безразмерный параметр  $\bar{\sigma}_y$  во второй точке численно равен  $\bar{\sigma}_{y2} = 0,5$ .

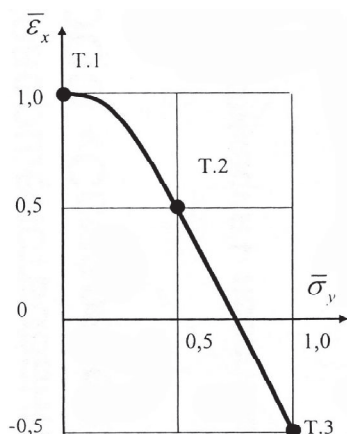
Таким образом, вторая точка на диаграмме  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  имеет координаты  $\bar{\varepsilon}_{x2} = 0,5$  и  $\bar{\sigma}_{y2} = 0,5$ .

Теперь найдём координаты третьей точки на этой диаграмме. Будем считать, что она соответствует напряжению  $\sigma_y = \sigma_0$ , т.е. безразмерному коэффициенту  $\bar{\sigma}_{y3} = 1$ .

В этом случае деформация поперечного растяжения будет равна предельно допустимой деформации, вычисленной для первой точки  $\varepsilon_y = [\varepsilon_x]_1$ , а деформация  $[\varepsilon_x]_3 = -m \varepsilon_y = -0,5$ . Из этого следует, что координаты третьей точки на диаграмме  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  численно имеют значения

$$\bar{\varepsilon}_{x3} = -0,5 \bar{\varepsilon}_{x1} = -0,5 \cdot 1 = -0,5 \text{ и } \bar{\sigma}_{y3} = 1.$$

Используя координаты этих трёх точек, диаграмму  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  можно аппроксимировать удобной для дальнейшего использования функцией вида



**Рис. 1.** Диаграмма зависимости безразмерного коэффициента  $\bar{\varepsilon}_x$  характеризующего величину предельной деформации обтяжки, от безразмерного коэффициента  $\bar{\sigma}_y$ , характеризующего величину поперечного натяжения заготовки: т.1, т.2 и т.3 – характерные точки

$$\bar{\varepsilon}_x = a\bar{\sigma}_y^2 + b\bar{\sigma}_y + c, \quad (20)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты, определяемые из условия прохождения аппроксимирующей функции через три заданные точки.

Подставив в (21) координаты трёх точек, получим систему линейных уравнений

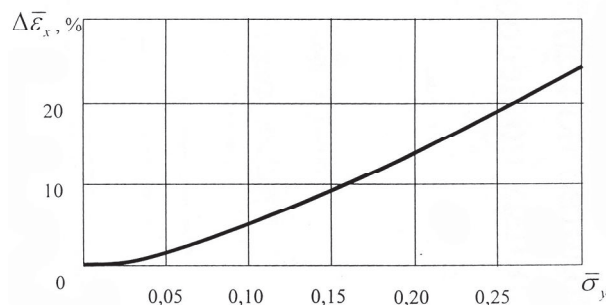
$$\begin{cases} 1 = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c; \\ 0,5 = a \cdot 0,5^2 + b \cdot 0,5 + c \\ -0,5 = a \cdot 1^2 + b \cdot 1 + c, \end{cases} \quad (21)$$

из решения которого следует, что  $a = -1, b = 1/2, c = +1$ . При этом выражение (20) сводится к виду

$$\bar{\varepsilon}_x = -\bar{\sigma}_y^2 + \bar{\sigma}_y/2 + 1. \quad (22)$$

Графическое изображение диаграммы  $\bar{\varepsilon}_x = f(\bar{\sigma}_y)$  приведено на рис. 1.

Величина критических сжимающих напряжений  $\sigma_{yкp}$  находится в интервале от 1 до 5 кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует безразмерному коэффи-



**Рис. 2.** Зависимость величины уменьшения предельно допустимой деформации обтяжки  $\Delta\bar{\varepsilon}_x$  от степени поперечного натяжения

листовой заготовки  $\bar{\sigma}_y$

циенту  $0,05 \leq \bar{\sigma}_y \leq 0,25$ . Такого поперечного натяжения листовой заготовки ( $\bar{\sigma}_y \leq 0,25$ ) будет вполне достаточно для исключения гофрообразования при обтяжке. Дальнейшее увеличение  $\bar{\sigma}_y$  никакой пользы не принесёт, а только уменьшит предельно допустимую величину деформации продольного растяжения.

На рис. 2 показан график зависимости величины уменьшения предельно допустимой деформации продольного растяжения листовой заготовки от величины её поперечного натяжения

$$\Delta\bar{\varepsilon}_x = (1 - \bar{\varepsilon}_x) \cdot 100\% = (\bar{\sigma}_y^2 + \bar{\sigma}_y/2) \cdot 100\%. \quad (23)$$

На рис. 2 видно, что при  $\bar{\sigma}_y = 0,15 \dots 0,20$  предельно допустимая деформация при обтяжке уменьшается на 10...15% от своего номинального значения, т.е. от того значения, которое соответствует обтяжке без поперечного натяжения листовой заготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
2. Арьенский Ю.М., Гречников Ф.В. теория и расчёты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990. 304 с.

## INFLUENCE OF CROSS-SECTION STRETCHING WHEN COVERING ON PLASTIC PROPERTIES OF THE MATERIAL OF DETAILS OF AIRCRAFT

© 2012 V.A. Barvinok<sup>1</sup>, S.G. Dementyev<sup>2</sup>, V.P. Samokhvalov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S.P Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>Aviastar-SP, Ulyanovsk

In article technological process of covering when manufacturing obvodobrazuyushchy details of aircraft is considered. Influence of cross-section stretching on plastic properties of metal is analyzed. The size of critical compressing tension and maximum permissible size of deformation of longitudinal stretching is defined.

Keywords: covering process, cross-section stretching, tension, deformation, limiting stretching, plastic properties, intensity of deformations

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.  
E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru

Sergey Dementiev, General Director. E-mail: director@aviastar-sp.ru  
Vladimir Samokhvalov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.