

УДК 629.73.002.2

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ ПОДГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОФИЛЕЙ

© 2011 П.М. Попов, Ф.Е. Ляшко, М.В. Савин

Институт авиационных технологий и управления  
Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье авторы рассматривают технические и производственно-технологические процедуры формирования геоцентрических параметров гнутолистовых профилей по различным аспектам: распределению углов подгибки, снятию деформаций, геометрических характеристик очагов деформаций, определению межклетевых расстояний, определению количества переходов технологического процесса предварительного формообразования, зон плавных переходов, а также проводят верификацию теоретических исследований геометрии очага деформации по поперечному смещению кромок по длине очагов деформации.

Ключевые слова: производственно-технологические процедуры, геоцентрические параметры, профили, деформации.

Исследование геометрических параметров очагов деформации плоских элементов на предварительных переходах позволили выявить и оптимизировать технологические процедуры по определению зависимостей углов подгибки плоских элементов в межклетевых промежутках на плавных переходах. Проведены так же исследования геометрических параметров очагов деформации профилей швеллерного, уголкового и сложного сечений (рис. 1).

Распределение углов подгибки полок по переходам иллюстрируются на примере используемой оснастки для изготовления профилей швеллерного и уголкового поперечного сечения (табл. 1).

Рекомендуются способы замеров геометрических параметров стационарного очага деформации тонкостенного равнополочного швеллера на промежуточном  $i$ -м переходе, распространяющегося в межклетевом пространстве в сторону предыдущего  $i-1$  перехода (рис. 2). Ширину поперечного сечения формуемой заготовки 1 (по кромкам)  $B(x)$  между предыдущим 2 и рассматриваемым 3 переходами замеряли при помощи штангенциркуля (ШЦ-250 ГОСТ427-75) 4, установленным на опоре 5, которая в свою очередь находилась на станине 6 станка (ГПС-300М6). При выполнении всех замеров геометрических параметров заготовок между валковыми перехо-

дами нижние валы были выставлены на один уровень. При замерах ширины  $B(x)$  ось штангенциркуля всегда устанавливалась параллельно осям ГПС. Расстояние от плоскости замера ширины  $B(x)$  до осевой плоскости актуальной пары замерялось рулеткой (1000 мм ГОСТ 7502-98).

Из геометрических параметров поперечного сечения профиля в очаге деформации косвенно определяется текущий угол подгибки (см. рис. 2):

$$\alpha(x) = \arccos[(B(x) - B) \cdot (2b)^{-1}], \quad (1)$$

где  $B$  – ширина стенки швеллера.

Изменение угла подгибки в межклетевом промежутке между  $i$  и  $i-1$  переходами равно  $\Delta\alpha(x) = \alpha(x) - \alpha_{i-1}$  и графически изображено на рис. 3а. Сравнивая значения теоретических кривых 1, 2, 3, 4 соответствующим ширине полок 20, 30, 40, 50 мм, с данными экспериментальных замеров (через каждые 10 мм по оси  $OX$ ), наблюдается их совпадение за исключением зоны, отстоящей от осевой плоскости рассматриваемой валковой пары не далее чем на 50 – 70 мм. Замеры ширины  $B(x)$  на промежутке  $x \in [0, 80 \text{ мм}]$  осуществлялись при поднятом верхнем ролике.

Длина очага деформации с точностью  $\pm 5\%$  находилась из условия относительной малости изменения ширины  $B(x)$  при увеличении расстояния  $x$  от осевой плоскости рассматриваемого валкового перехода до плоскости измерения (см. рис. 2). Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами длины плавного перехода смоделированы на рис. 3б. Для этого профили швеллерного, уголкового и др. сечений формовались как за 4, так и за 6 технологических переходов с углами подгибки за проход соответственно 22 - 24° - для первого случая и 16 - 17° - для второго случая.

*Попов Петр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение».*

*E-mail: pmporov2008@rambler.ru.*

*Ляшко Фёдор Евгеньевич, доктор технических наук, директор, профессор кафедры «Экономика, управление и информатика».*

*Савин Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Самолетостроение».*

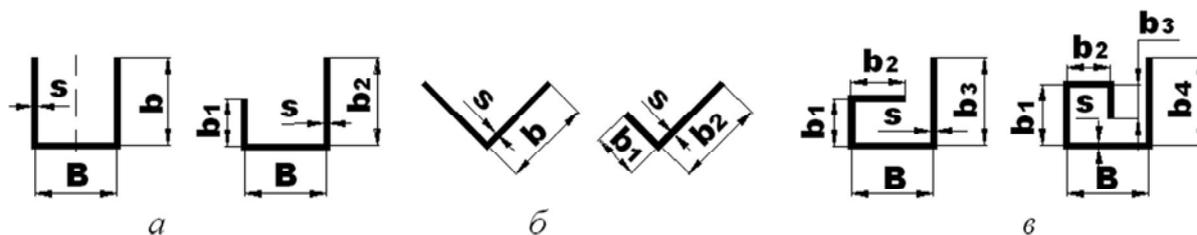
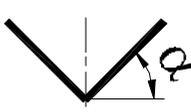


Рис. 1. Поперечные сечения исследуемых профилей с плоскими полками: а – швеллерного сечения; б – уголкового сечения; в – сложного сечения

Таблица 1. Распределение углов подгибки полков по переходам

Поперечное сечение	s, мм	b, мм	Кол-во пер., n	Углы подгибки по переходам $\alpha, ^\circ$
Швеллер 	0,6	<40	6	0-25-45-64-80-92-90
		>40	8	0-20-37-52-65-76-85-92-90
	1	<40	(4-6)	0-20-45-65-80-92-90
		>40	(6-8)	0-15-30-50-65-80-93
	1,5	<40	4	0-25-45-75-90
		>40	6	0-25-64-80-92-90
Уголок 	0,6	<40	4	0-18-31-41-45
		>40	6	0-12-25-32-37-41-45
	1	<40	4	0-20-32-40-45
	1	>40	6	0-14-26-33-38-43-45
	1,5	<40	2	0-25-45
	1,5	>40	4	0-22-34-41-45

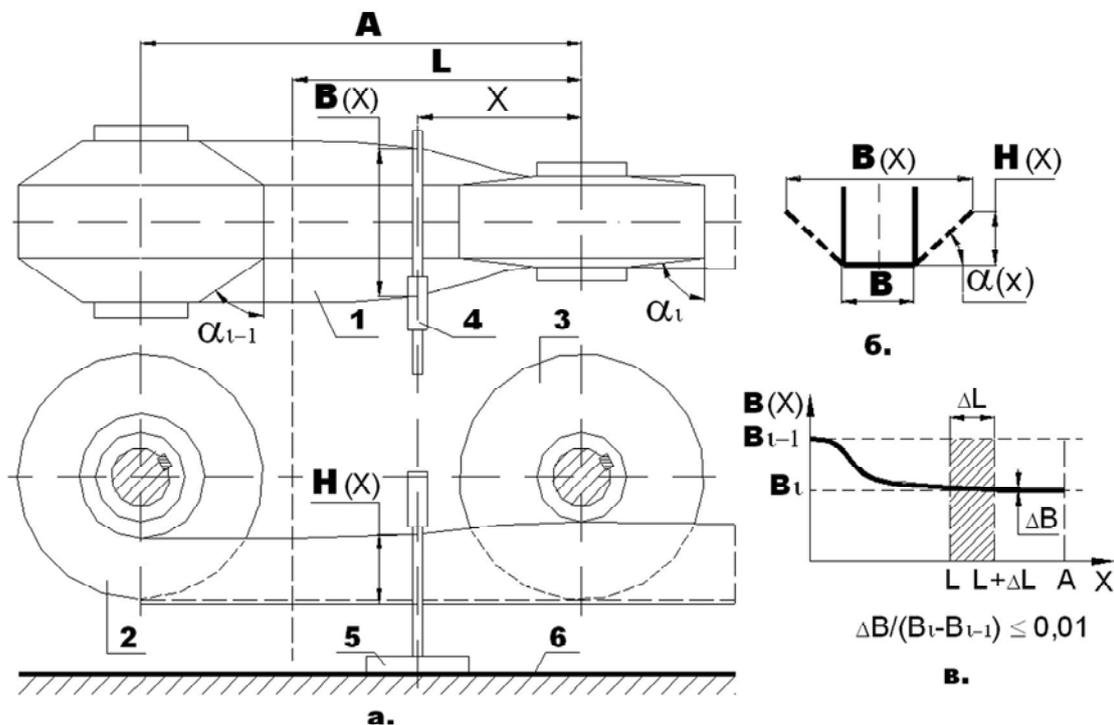


Рис. 2. Схема снятия замеров очага деформации: а – вид на исследуемый объект сверху и сбоку; б – поперечное сечение заготовки в очаге деформации; в – определение длины очага деформации

В процессе экспериментальных исследований рассматривалась процедура влияния межклетьевого расстояния  $A$  на геометрические характеристики очага деформации. Для этого формообразование проводилось на шестиклетьевых станках

ГПС - 300 М6 (350, 500), где роликовые пары устанавливались через клеть или две клетки.

При этом межклетьевое расстояние равнялось 800 мм или 1200 мм. Однако, изменение межклетьевого расстояния со стандартных

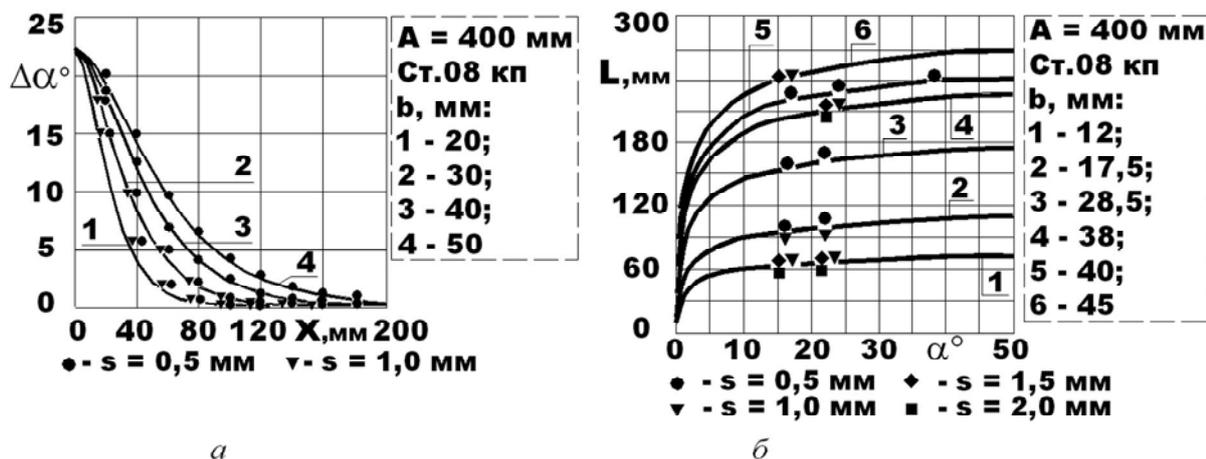


Рис. 3. Геометрические характеристики очагов деформации:

а – изменение угла подгибки в межклетьевом промежутке; б – длина очага деформации

$A = 400 \text{ мм}$  до  $800 \text{ мм}$  (или  $1200 \text{ мм}$ ) заметно сказывается на увеличении длины плавного перехода лишь для очень широких подгибаемых элементов ( $b/A \geq 0,2 - 0,25$ ), когда предыдущий переход ограничивает распространение очага деформации рассматриваемого перехода.

В завершении исследований производился эксперимент по формованию профилей из заготовок одинаковой толщины и неизменных других параметров из материалов Д16АМ, В95пчАМ, Ст.08ю, Ст.08кп, Ст.08пс, Ст.3. Доказано, что разница в длине очагов деформации не превышает 3 – 5 %, что несущественно и может быть отнесена на погрешность эксперимента.

В результате проведенных исследований и экспериментов выявлены следующие явления:

1. Длина очага деформации  $L$  определяется по полному снижению изменения  $B(x)$  в зависимости от  $x$  и зависит от ширины подгибаемой полки, угла подгибки за проход и межклетьевого расстояния.

2. Наблюдается незначительная зависимость геометрии очага деформации от толщины и механических свойств заготовки.

*Геометрические параметры очагов деформации многоэлементных подгибаемых полок*, с двухэлементными подгибаемыми полками проводились в процессе апробации различных схем формовки методом интенсивного деформирования на станках семейства ГПС (ГПС-200М4, ГПС-300М4, ГПС-350М6, ГПС-500М6, ГПС-350М8, ГПС-500М8) для профилей:

- замкнутого прямоугольного и квадратного поперечных сечений –  $10 \times 15 \times 1$ ,  $40 \times 25 \times (1,5-2)$ ,  $29 \times 29 \times (1,5-2)$ ,  $15 \times 25 \times (1-1,5)$ ,  $25 \times 15 \times (1,2-2)$ ,  $20 \times 45 \times 1$ ,  $20 \times 38 \times (1,5-2)$ ,  $40 \times 50 \times 2$ ,  $40 \times 60 \times 3$ ,  $25 \times 25 \times 1,5$ ,  $15 \times 30 \times 1,5$ ;

- С-образного сечения (швеллеры с отбортовками) –  $40 \times 20 \times 6 \times (1,5-2)$ ,  $150 \times 45 \times 15 \times (0,7-1,5)$ ,  $200 \times 80 \times 20 \times 2$ ,  $30 \times 30 \times 5 \times 1,5$ ,  $30 \times 30 \times 8 \times (2,5-3)$ ,

$18 \times 20 \times 6 \times (1,2-1,5)$ ,  $50 \times 50 \times 6 \times 0,55$ ,  $75 \times 50 \times 6 \times 0,55$ ,  $100 \times 50 \times 6 \times 0,55$ ,  $60 \times 35 \times 10 \times 0,6$ ;

- корытообразного сечения –  $80 \times 30 \times (0,8-1)$ ,  $95 \times 40 \times 1,0$ ,  $45 \times 15 \times 1,5$ ,  $65 \times 40 \times (0,8-1)$ ;

- сложных поперечных сечений с элементами двойной толщины ( $H$ -,  $F$ -,  $L$ -образных сечений и др.).

Распределение углов подгибки по технологическим переходам для некоторых типажей профилей представлено в таблице П6.1. Замеры геометрии очагов деформирования проводились аналогично как для плоских полок.

Например, при отработке схем формования крупногабаритных профилей С-образного  $200 \times 80 \times 20 \times 2$  (рис. 4.  $h = 80 \text{ мм}$ ;  $b = 20 \text{ мм}$ ) и замкнутого прямоугольного сечений ( $40 \times 60 \times 3$ ) за 6 технологических переходов на станке ГПС-500М6 на последних формирующих переходах наблюдается недостаточность межклетьевого расстояния на исследуемом оборудовании, где расстояние  $A = 400 \text{ мм}$ .

Из-за “жесткого” режима формования значительно увеличиваются крутящие моменты привода валковых пар последних переходов, происходит интенсивный износ контактирующих с полосой поверхностей роликов, нарушается качество поверхности заготовки и готовые профили имеют значительную продольную кривизну (прогиб более  $15 \text{ мм}$  на  $1 \text{ м.п.}$ ) при расположении всех нижних валов стана на одном горизонтальном уровне. Минимизировать энергозатраты и повысить качество поверхности готовых профилей позволяет применение конических поверхностей с углами в пределах  $\psi = 1 - 3^\circ$  взамен вертикальных контактирующих с заготовкой элементов роликов (см. рис. 4).

*Геометрические параметры очагов деформации криволинейных подгибаемых полок* профилей с криволинейными полками подтверждают адекватность модели очага деформации (рис. 5). На

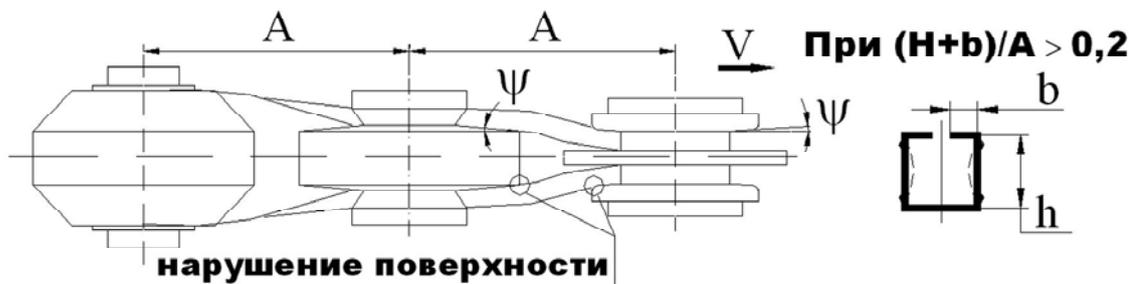


Рис. 4. Схема межклетьевого расстояния (недостаточность размеров A)

примере изготовления двух Z-образных профилей с поперечными сечениями показанными на рис. 5, исследовалось влияние схем формообразования на геометрические характеристики очагов деформации подгибаемых полок, а также предельные возможности интенсификации формообразования на переходах предварительного формообразования. Рис. 5а:  $H = 25$  мм;  $A_1 = 18$  мм;  $A_2 = 16$  мм;  $h = 4$  мм;  $r = 2,0$  мм. Рис. 5б:  $H = 20$  мм;  $A_1 = 18$  мм;  $A_2 = 8$  мм;  $h = 4$  мм;  $r = 2,4$  мм;  $R = 1000$  мм. Исходные материалы заготовок – плакированные листы из сплавов Д16АМ (ГОСТ 21631-76) и В95пчАМ (ГОСТ 190246-77) толщиной  $s = 0,8$  мм и 1,0 мм. Листы разрезались дисковыми ножницами типа ДИН-1500 на полосы шириной 58,0 мм и 45,6 мм с допуском  $+ 0,2$  мм соответственно для профилей показанных на рис. 5а и рис. 5б.

Направление оси  $Ox$  декартовой системы координат обратно движению полосы  $V$ , ось  $Oy$  – в срединной плоскости недеформированной заготовки, ось  $Oz$  – нормально к плоскости  $XOy$  в сторону деформирования. Начало отсчета декартовой системы координат  $t$ .  $O$  находится на осевой плоскости актуального перехода (рис. 6а).

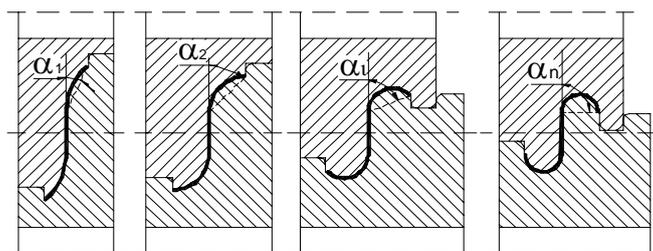
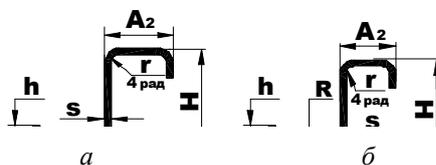
Поперечное смещение (в направлении оси  $Oz$ ) точки на кромке полосы  $t$ .  $K$  в любом транс-

версальном сечении очага деформации определится выражением:

$$B(\alpha) = b \alpha^{-1} \sin^2(\alpha), \quad (2)$$

где  $b$  – длина дуги (ширина) криволинейной полки;  $\alpha = \alpha(x)$  – угол подгибки полки по кромке в зависимости от продольной координаты  $x$ . Ширина полки  $b$  находилась равенствами  $b = \pi A_1/2$  или  $b = \pi A_2/2$ .

Верификация теоретической зависимости (2) проводилась непосредственными замерами изменения поперечной ширины криволинейной полки (по кромке)  $B$  по длине очагов деформации. По таким параметрам были построены графические зависимости изменения ширины  $B$  (в среде MathCAD2001i), с которыми проводили сравнение экспериментальных данных замеров. Измерения ширины  $B_i(x)$  в зависимости от расстояния до осевой плоскости рассматриваемого валкового перехода проводились на извлеченной из роликовых пар отформованной заготовке (рис. 6в, рис. 7) при помощи штангенциркуля (ШЦ-250 ГОСТ427-75) с шагом замеров по длине – 10 мм. Это связано с небольшими габаритными размерами сечений профилей (см. рис. 5а, б) и соответственно короткими зонами очагов деформации.



в

Рис. 5. Поперечные сечения Z-образных профилей (а, б) и роликовые пары переходов предварительного формообразования (в)

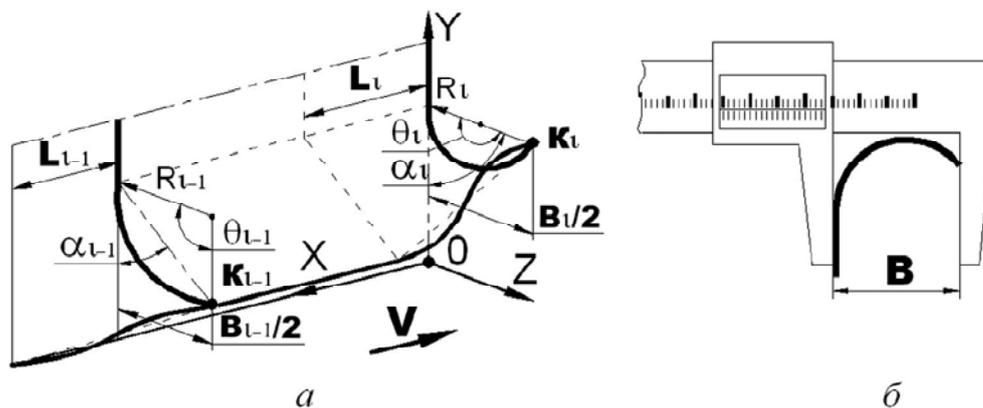


Рис. 6. Схема формообразования волнистой предварительной заготовки Z-образного профиля на i-1 и i-м переходах (а) и схема замера ширины B (б)

На рис. 8а показаны результаты сравнения геометрических характеристик криволинейной полки в зонах плавных переходов при  $A_f = 18$  мм (см. рис. 5а) для углов подгибки на роликовой оснаст-

ке (по кромке)  $\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3; \alpha_4$  соответственно 25; 45; 67; 90° (кривые 1, 2, 3, 4). Далее исследовались более интенсивные схемы формообразования для чего формовку производили не используя не-

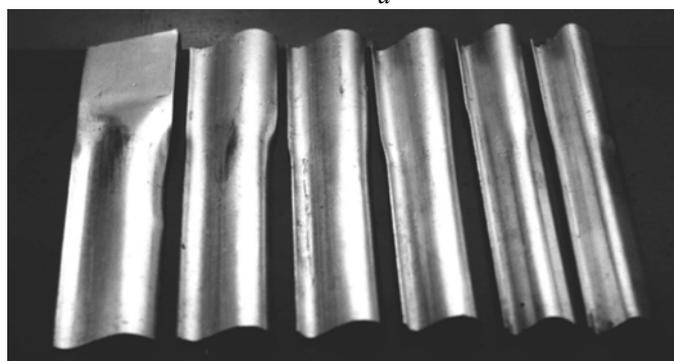
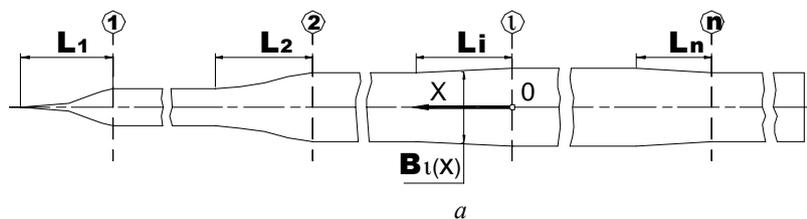


Рис. 7. Схема замеров характеристик очагов деформации (а) и образцы зон плавных переходов Z-образного профиля 25x18x16x4 (б)

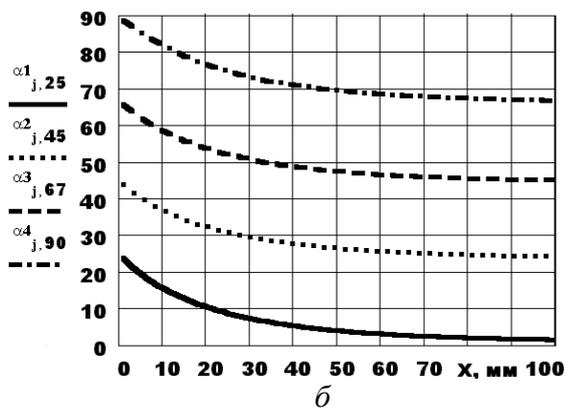
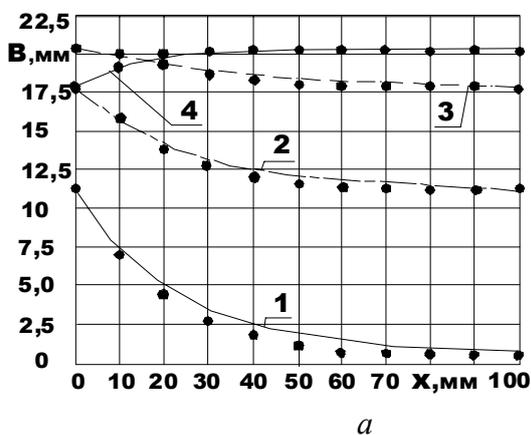


Рис. 8. Верификация теоретических исследований геометрии очага деформации по поперечному смещению кромок (а); распределение углов подгибки по длине очагов деформации (б)

Таблица 2. Схемы формообразования

Номер перехода	1	2	3	4	Угол подгибки за проход, $\Delta\alpha^\circ$
Формообразование на данном переходе	+		+		42
	+			+	65
				+	90
		+		+	45
			+	+	67

которые переходы, что показано в табл. 2.

Кроме вышеперечисленных материалов эксперименты производили с заготовками из стали 08кп, 08пс, 08ю толщиной  $s = 0,5; 0,55; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0$  мм, однако существенное изменение геометрических характеристик зон плавных переходов в зависимости от механических свойств материалов не наблюдалось. Зависимость геометрии очагов деформирования (длины и распределения угла подгибки по кромке) от толщины заготовок в рассматриваемом диапазоне незначительна 5 – 8 % и может быть объяснена неточностью измерений.

Таким образом, изменение угла подгибки в очагах деформации для криволинейных подгибаемых участков тонкостенных профилей во всех случаях рассчитывалось по кромке (торцам), по-

скольку расчеты продольных деформаций растяжения и критических углов подгибки за проход для назначения оптимальных схем формообразования, также рассчитывались по кромке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перфильев О.В.* Совершенствование технологии изготовления гнутолистовых профилей авиационных конструкций стесненным изгибом. Дисс... канд. техн. наук. 05.07.02 – “Проектирование, конструкция и производство ЛА”. Самара. 2011. С. 164.
2. *Рыжаков С.Г.* Повышение эффективности технологических процессов при изготовлении трубчатых крупногабаритных листовых деталей летательных аппаратов. Дисс... канд. техн. наук. 05.07.02 – “Проектирование, конструкция и производство ЛА”. Самара. 2011. С. 156.

## TECHNICAL PROCEDURES OF DEFINITION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF DEFORMATION OF TURNED IN ELEMENTS OF STRUCTURES

© 2011 P.M. Popov, F.E. Ljashko, M.V. Savin

Institute of Aviation Technologies and Managements,  
Ulyanovsk State Technical University

In clause authors consider technical and industrial-technological procedures of formation earthen parameters bent structures on various aspects: to distribution of corners bend, to removal of deformations, geometrical characteristics of the centers of deformations, definition between cells distances, to definition of quantity of transitions of technological process preliminary educations of forms, zones of smooth transitions, and also spend verification of theoretical researches of geometry of the center of deformation on cross-section displacement of edges on length of the centers of deformation.

Key words: industrial-technological procedures, earthen parameters, structures, deformation.

*Petr Popov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Construction Department. E-mail: pmpopov2008@rambler.ru.  
Feodor Ljashko, Doctor of Technics, Director, Professor at the Economy, Management and Computer Science Department.  
Maxim Savin, Senior Lecturer at the Aircraft Construction Department.*