

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТОЛИСТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДАМ

© 2011 П.М. Попов<sup>1</sup>, Ф.Е. Ляшко<sup>1</sup>, С.Г. Рыжаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт авиационных технологий и управления

Ульяновского государственного технического университета

<sup>2</sup> Ульяновский филиал конструкторского бюро ОАО «Туполев»

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье авторы предлагают и расшифровывают классификатор схем приложения торцевого усилия на окончательных переходах технологического процесса изготовления профилей в валковой оснастке; модели нагружения сжатой полки; изменения параметров угловой зоны при формообразовании профилей с силовой расчетной схемой сжатия полки; зависимости критических напряжений сжатия. Разрабатывают математические модели этих процессов и явлений для цели совершенствования технологических процессов производства тонких гнутолистовых профилей. Представляют графоаналитические модели и расписывают механизм возникновения кромковой волнистости.

Ключевые слова: графоаналитические методы, процедуры моделирования, технологические процессы, гнутолистовые профили.

Направление передачи усилий торцевого поджатия со стороны элементов закрытого калибра валковой пары зависит от расположения периферийного элемента профиля. На рис. 1а предложены три варианта направления приложения усилия торцевого сжатия  $T$ :

- в вертикальной плоскости;
- в горизонтальной плоскости;
- в наклонной плоскости.

Для всех случаев краевой сжимаемый элемент, криволинейный в плане, до формовки выправляется до плоского путем раскатки гребня волны цилиндрическими элементами валков – 1, 2 варианты и коническими элементами валков – вариант 3 на осевой плоскости роликовой пары.

Сжимаемые элементы практически плоские (некоторая поперечная кривизна элементов образуется из-за усилий сворачивания передающихся от осевой плоскости валковой пары на свободную заготовку в очаге деформации), а радиусы угловых зон уменьшаются от усилий торцевого поджатия не более чем на 50% (рис. 1б вариант 5).

При формообразовании замкнутых (рис. 1б вариант 1) или полузамкнутых профилей (рис.

1б вариант 2) схема формовки элементов заготовки свободная и для получения качественных профилей с заданными точностными характеристиками линейных размеров элементов и радиусов зон сгиба необходимы:

- выбор ширины исходной заготовки с качественной поверхностью торцов;
- высокая точность изготовления контуров рабочих калибров окончательных переходов.

В некоторых случаях возможна частичная поддержка сжимаемых элементов (см. рис. 1б вариант 3) или полностью свободные элементы (см. рис. 1б варианты 4, 7), но в обоих случаях линейный размер сжимаемых элементов формируется путем фиксации угловой зоны в валковом калибре. В других случаях (см. рис. 1б варианты 6, 8) зона сгиба ничем не зафиксирована и поддержка (передача усилия торцевого поджатия) обеспечивается только жесткостью свободных элементов расположенных далее рассматриваемой зоной сгиба.

В целях интенсификации процесса гибки - прокатки тонкостенных профилей в валках методом стесненного изгиба с обеспечением заданного качества готовой продукции следует сравнивать критические сжимающие нагрузки, которые зависят от основных параметров заготовки и формирующего инструмента, а также от тангенциальных нагрузок для формообразования угловой зоны. Предлагается три варианта приложения торцевых сжимающих нагрузок, имеющих одинаковую равнодействующую:

1. Равномерное распределение нагрузки по длине контактной зоны;

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

*E-mail: ptporov2008@rambler.ru.*

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

*Рыжаков Станислав Геннадьевич, Зам. Главного конструктора, кандидат технических наук, директор.*

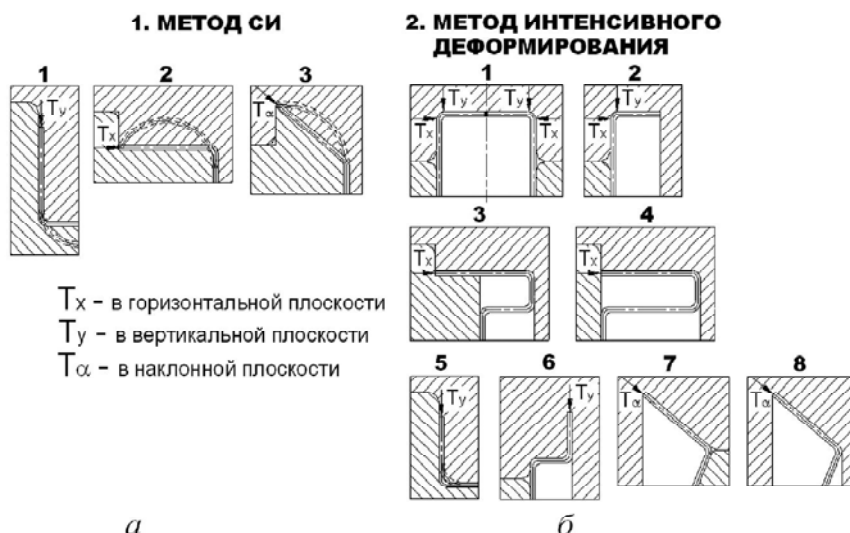


Рис. 1. Классификатор схем приложения торцевого усилия на окончательных переходах валковой оснастки:  
а – метод СИ; б – метод интенсивного деформирования

2. Куполообразное распределение нагрузки по длине зоны контакта;

3. Сосредоточенная сила.

Для определения силовой схемы исследовано изменение формы заготовки на каждом переходе, которое реализуется в оснастке (рис. 2), где  $V$  - направление прокатки,  $i - 1$  - предыдущий переход,  $i$  - рассматриваемый переход.

Сжатие торца краевого элемента начинается еще до захода в калибр (до осевой плоскости валков), там же наблюдается и потеря устойчивости. Протяженность контактной зоны  $L_k$  (участка передачи усилий осадки от уступа валка на торец заготовки) значительно влияет на значение критической сжимающей силы, то есть является ее определяющим параметром. Аналогично теории горячей прокатки [1], зная величину осадки торца полки в актуальном переходе  $\Delta b = b_{i-1} - b_i$  (смещение кромки полки в вертикальном направлении) и радиус уступа ролика  $R$ , несложно найти длину контактной зоны с учетом указанных на рис. 2 геометрических параметров (для абсолютно жестких валов и клетки):

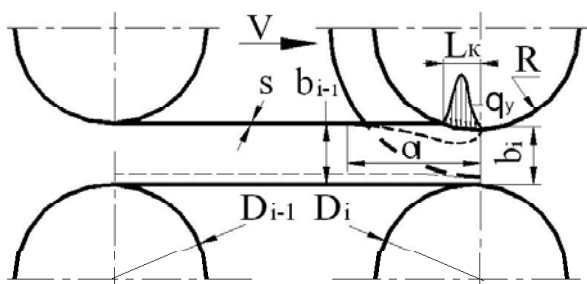


Рис. 2. Модель нагружения сжатой полки в межклетьевом промежутке

$$L_k = (2\Delta BR)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $\Delta B = b_{i-1} - b_i$  - осадка торца полки в рассматриваемом переходе;  $b_i$  - ширина полки в рассматриваемом переходе  $i$ ;  $b_{i-1}$  - ширина полки в предыдущем переходе  $i - 1$ .

Значение осадки торца полки  $\Delta B$  определим на основе геометрических характеристик зоны сгиба (рис. 3):

$$\Delta B = 2(r_{i-1} - r_i)(1 - \pi/4) + ks_0, \quad (2)$$

где  $r_{i-1}$  и  $r_i$  - соответственно внутренние радиусы зон сгиба предыдущего и актуального переходов;  $k = \Delta B_3/ns_0$  - коэффициент избытка ширины заготовки, предусмотренный для одной зоны сгиба, учитывающий запас материала на утолщение уголкового зоны и увеличение нейтрального радиуса при гибке с тангенциальным сжатием;  $\Delta B_3$  - избыток (превышение) ширины заготовки по сравнению с разверткой сечения готового профиля;  $n$  - количество зон сгиба на профиле;  $s_0$  - толщина исходной заготовки. Коэффициент избытка ширины полосы определяется по номограмме [2] с учетом радиуса гибки  $r$  и относительного удлинения исходного материала  $\delta$  при испытании на растяжение.

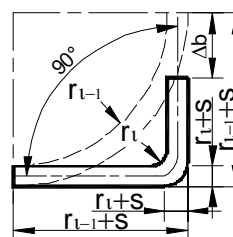


Рис. 3. Изменение геометрических параметров уголкового зоны в процессе формоизменения

Далее рассмотрим и проанализируем упругую устойчивость пластины для изготовления гнутолистовых профилей.

1. Значения критических усилий сжатия следует определять из силовой схемы, показанной на рис. 4 (вариант распределения нагрузки 1), где направление оси  $OX$  противоположно направлению движения полосы  $V$ , осевая плоскость валков –  $YOZ$ , линия сопряжения зоны сгиба и прямолинейной полки – ось абсцисс  $OX$ . Сжимаемую полку представим в виде пластины высотой  $b$  и толщиной  $s$ , длину полки считаем намного большей ее высоты. Удельная тангенциальная сжимающая нагрузка  $q_y = const$  воздействует на кромку заготовки на участке зоны передачи усилий  $x \in [0, L_k]$ . Реальные условия закрепления нижнего края пластин (полки) сравниваются с процедурой защемления в шарнирной опоре. Тогда изгибающие моменты, определенные с таким допущением, будут заметно завышены.

Общую силу тангенциального сжатия следует рассчитывать по формуле:

$$P = L_k q_y \quad (3)$$

Запишем ограничения условия для краев пластины при:

при  $x = 0$  (шарнирное закрепление)

$$\omega = 0; \quad \partial^2 \omega / \partial x^2 = 0;$$

при  $y = 0$  (защемление)

$$\omega = 0; \quad d\omega / dy = 0, \quad (4)$$

где  $\omega$  – бифуркационное поперечное перемещение полки (рис. 3).

Следовательно, линеаризованное уравнение из теории устойчивости пластин постоянной толщины запишем как:

$$M[\omega] - PL[\omega] = 0, \quad (5)$$

где  $M[\omega] = D \nabla^2 \nabla^2 \omega$  – дифференциальное выражение;  $D = Es^3 / 12(1 - \mu^2)$  – изгибная (цилиндрическая) жесткость;  $E$  – модуль упругости материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $L[\omega]$  – дифференциальное выражение:

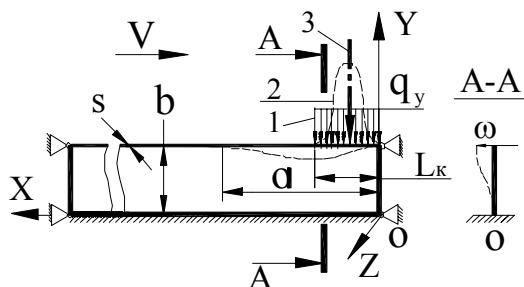


Рис. 4. Силовая расчетная схема сжатой полки при различных вариантах нагружения

$$L[\omega] = \frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{T}_x^0 \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{S}_0^0 \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{S}_0^0 \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{T}_y^0 \frac{\partial \omega}{\partial y} \right),$$

$$\overline{T}_x^0 = \overline{T}_x^0(x, y); \quad \overline{T}_y^0 = \overline{T}_y^0(x, y);$$

$$\overline{S}_0^0 = \overline{S}_0^0(x, y) -$$

распределение начальных единичных внутренних сил в срединной плоскости пластины (при  $P = 1$ ).

При  $P = 1; T_x^0 = S^0 = 0; T_y^0 = -q_y$  (сжатие) уравнение (5) принимает вид

$$D \left( \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) + q_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0. \quad (6)$$

Далее, используя систему тригонометрических функций, которые удовлетворяют решению в области формообразования гнутолистовых профилей с учетом граничных условий, функцию запишем в виде следующего выражения:

$$\omega(x, y) = C_i f_i(x, y), \quad (7)$$

где  $f_i(x, y)$  – заранее выбранные функции, удовлетворяющие краевым условиям задачи;  $C_i$  – коэффициенты, подлежащие определению (варьируемые параметры).

При решении задачи устойчивости методом Галеркина функцию поперечного прогиба задаем в виде ряда [2]:

$$\omega = \sum_{i=1}^m C_i \cdot f_i(x, y), \quad i = 1, \dots, m. \quad (8)$$

Подстановка этого ряда в исходное уравнение (6) дает некоторую ошибку по функции, которая не равна нулю. Ограничиваемая первым членом ряда (8), при  $f_i(x, y) = \sin(\pi x/a) [1 - \cos(\pi y/b)]$ , где  $a$  – длина полуволны аппроксимирующей функции получим:

$$L = C_1 D \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right)^4 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \right) - \right. \\ \left. - 2 \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \right.$$

$$-\left(\frac{\pi}{b}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) + q_y \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right). \quad (9)$$

Умножив ошибку по функции  $L$  на базисную функцию  $f_1(x, y)$  и выполнив интегрирование по всей площади полки при условии, что действие распределенной нагрузки  $q_y$  ограничено пределами  $x \in [0; L_\kappa]$  и  $y \in [0; b]$ , запишем:

$$\int_0^a \int_0^b L f_1(x, y) dx dy = 0. \quad (10)$$

В результате интегрирования и упрощения получим равенство:

$$\frac{1}{2} L_1 \left\{ D a \left[ \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 b + \left( \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \right)^2 \frac{b}{2} \right] - q_{кр} \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \frac{a}{2\pi} \left( \frac{2\pi L_\kappa}{a} - \sin\left(\frac{2\pi L_\kappa}{a}\right) \right) \frac{b}{2} \right\} = 0. \quad (11)$$

Чтобы решения были отличны от тождественного нуля, выражение в фигурных скобках должно обращаться в нуль. В соответствии с условием (11) сформулируем математическую модель для вычисления приближенного значения критических нагрузок:

$$q_{кр} = \frac{4\pi D \left\{ \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 + \left[ \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \right]^2 / 2 \right\}}{\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 [2\pi L_\kappa / a - \sin(2\pi L_\kappa / a)]}. \quad (12)$$

2. Для решения задачи устойчивости, используя энергетический критерий, определяем критические сжимающие нагрузки, распределенные по длине зоны нагружения  $L_\kappa$  по куполообразному закону  $q_y(x)$ , равнодействующая которых эквивалентна  $P$  (3). Такой закон распределения наиболее точно описывает действительное нагружение торца заготовки при осадке (вариант распределения нагрузки 2) (см. рис. 3):

$$q_y(x) = q_{y0} (1 - \cos(2\pi x / L_\kappa)). \quad (13)$$

Решение при варианте нагрузки (13) имеет вид:

$$q_{кр} = \frac{4\pi D \left\{ \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 + 1/2 \left[ \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right]^2 + 2(1-\mu) \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right\}}{\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 [2\pi L_\kappa / a - \sin(2\pi L_\kappa / a)]}. \quad (14)$$

3. Анализируем устойчивость полки при по-

перечном сжатию ее локальной силой  $P_y = q_y L_\kappa$  (рис. 3), (вариант распределения нагрузки 3), приложенной на расстоянии  $L_\kappa/2$  от оси  $OY$ . Условия закрепления краев и габариты пластины такие же, как и выше. Функция прогибов приобретает аналогичную форму  $f_1(x, y)$ .

Изменение полной потенциальной энергии полки составляет:

$$\Delta \mathcal{E} = U_x - P_y s^{-1} \int_0^b \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{x=L_\kappa/2}^2 dy, \quad (15)$$

где энергия изгиба полки  $U_c$  вычисляется так:

$$U_x = \frac{Dab}{4} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 + 2(1-\mu) \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right\}$$

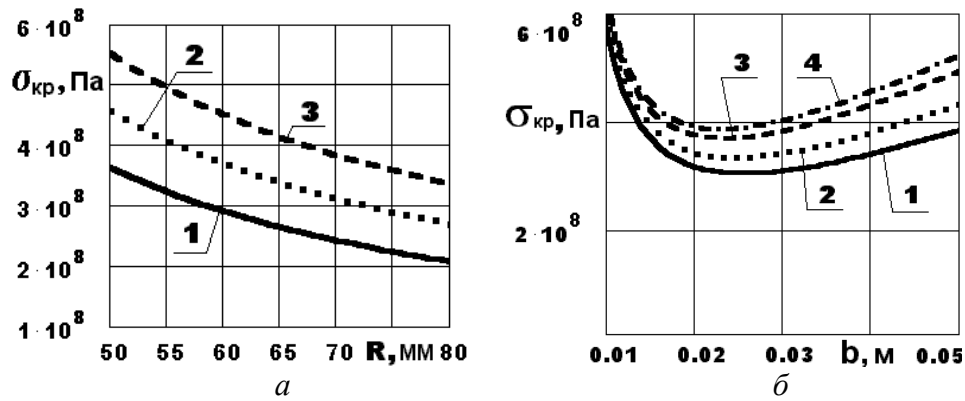
При условии  $\Delta \mathcal{E} = 0$  критическая сосредоточенная сила составит:

$$P_y = \frac{Dabs}{(\pi/b)^4 b \sin^2(\pi L_\kappa / 2a)} \times \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 + 2(1-\mu) \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right\}. \quad (16)$$

Заменяя значения  $L_\kappa$  в равенствах (12), (14), (16) выражением (1) и минимизируя полученные зависимости по параметру  $a$ , найдем минимальные значения критических нагрузок  $q_{кр.min}$ . При этом функция, реализующая этот минимум, описывает форму потери устойчивости полки.

Конечные выражения критических нагрузок, найденные как приближенным методом Галеркина (12), так и с помощью энергетического критерия Брайана (14), имеют незначительные отличия в числителях и сходятся для малых отношений длины контактной зоны к длине полуволны бифуркационного перемещения ( $\pi L_\kappa / 2a \ll 1$ ). Значения критической сосредоточенной силы (16) на 25% больше суммарных равнодействующих критических распределенных нагрузок, определенных по формулам (12) и (14), что объясняется условно принятым приложением сосредоточенной эквивалентной силы на расстоянии  $L_\kappa/2$  от осевой плоскости валков (рис. 3).

На рис. 5а показана зависимость критических напряжений торцевого поджатия полки шириной  $b = 30$  мм в зависимости от радиуса уступа валка  $R = 50...80$  мм для материала заготовки В95АМ толщиной  $s_0 = 0,6$  мм;  $s_0 = 0,8$  мм;  $s_0 = 1,0$  мм (что соответствует кривым 1, 2, 3);  $r_{i-1} = 4$  мм;  $r_i = 0,8$  мм. Рис. 5б показывает влияние на критические напряжения сжатия внутреннего радиуса зоны сгиба на окончательных переходах  $r_i = 0,8; 1,2; 1,6; 2,4$  мм (кривые 1, 2, 3, 4);  $b = 10...50$  мм; материал заготовки В95АМ;  $s = 0,8$  мм;  $R = 70$  мм;  $r_{i-1} = 4$  мм.



**Рис. 5.** Зависимости критических напряжений сжатия: а – от радиуса уступа валка; б – от окончательного внутреннего радиуса зоныгиба

При увеличении основных диаметров валков от перехода к переходу и при условии отсутствия проскальзывания заготовки между валками, напряжение аксиального натяжения полосы определим из закона Гука (для напряжений меньших предела текучести  $\sigma_s$ ):

$\sigma_x = E\varepsilon_x = E(D_i - D_{i-1})/D_i = E\Delta D/D_i$ , (17)  
 где  $D_i, D_{i-1}$  – соответственно основные диаметры нижних валков актуального (окончательного) и предыдущего переходов.

Значения равномерно распределенных по ширине полки продольных (аксиальных) нагрузок растяжения найдем из зависимости:

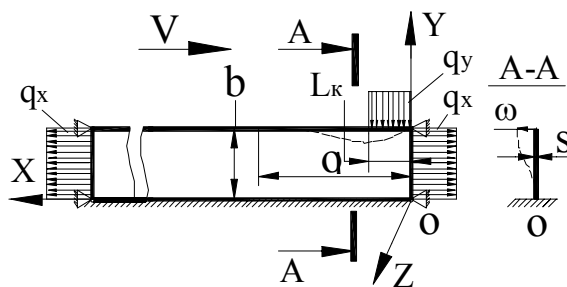
$$q_x = \sigma_x s_0 = s_0 E(D_i - D_{i-1})/D_i. \quad (18)$$

Для исследования устойчивости тонкой полки, нагруженной в своей плоскости равномерно распределенными усилиями сжатия  $-q_y$  и растяжения  $+q_x$ , используем энергетический критерий в форме Брайана. Это позволяет простым путем определить значения критических нагрузок при известных начальных силах в плоскости полки (рис. 6).

Бифуркационные перемещения  $\omega$  зададим в виде

$$\omega = \alpha \omega_1(x, y), \quad (19)$$

где  $\alpha$  – независящий от координат бесконечно малый параметр;  $\omega_1$  – конечная фун-



**Рис. 6.** Силовая расчетная схема сжатой полки при аксиальном натяге в направлении оси ОХ

кция координат. Функция прогибов  $\omega_1 = \sin(\pi x/a)[1 - \cos(\pi y/b)]$  аналогична  $f_i(x, y)$ . Энергетический критерий Брайана в общей форме имеет вид

$$\delta(\Delta \mathcal{E}) = 0, \quad (20)$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  – изменение полной потенциальной энергии. Изменение полной потенциальной энергии складывается из энергии изгиба  $U_x$  и изменения начальной энергии деформации полки в своей плоскости [3]:

$$\Delta \mathcal{E} = U_x + \int_0^a \int_0^b T_x^0 \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 dx dy + \int_0^{L_k} \int_0^b T_y^0 \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 dx dy, \quad (21)$$

где энергия деформации изгиба полки в искривленном положении  $U_x$ , заданном областью определения функции  $\omega_1(x, y)$ ,  $x \in [0; a]$ ,  $y \in [0; b]$ , записывается так:

$$U_x = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b D \left\{ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1 - \mu) \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] \right\} dx dy.$$

$T_x^0 = +q_x$  и  $T_y^0 = -q_y$  – распределение начальных сил в срединной плоскости полки.

В результате получим выражение для определения критической распределенной нагрузки сжатия

$$q_{y,cr} = \pi \frac{2\pi^2 D [b^{-2} + 3b^2 a^{-4} + (2 - 4\mu)a^{-2}] + 6b^2 a^{-2} q_x}{[2\pi L_k/a - \sin(2\pi L_k/a)]}. \quad (22)$$

После постановки значения  $\Delta b$  из (2) в (1),

значение  $L_k$  из (22) и  $q_x$  из (18) в зависимость (22) и минимизации последней по параметру  $a$  получим функциональную зависимость минимальных критических нагрузок сжатия от геометрических параметров заготовки, валковой оснастки и механических свойств исходного материала. Выражение (22) позволяет определить значение критических, равномерно распределенных нагрузок сжатия в зависимости от геометрических параметров роликовой оснастки заготовки и механических свойств используемого материала. Формула (22) также определяет зависимость критических, равномерно распределенных нагрузок от равномерно распределенных по ширине полки аксиальных нагрузок растяжения  $q_x$ . Минимальные критические напряжения сжатия составляют

$$\sigma_{y.kp \min} = q_{y.kp \min} s_0^{-1} \quad (23)$$

На рис. 7 показаны зависимости критических напряжений сжатия  $\sigma_{kp}$  от ширины полки и внутренних радиусов уголковой зоны на рассматриваемом  $i$ -м переходе.

Данные приведены для материала В95АТ толщиной  $s_0 = 0,8$  мм ( $E = 7,2 \cdot 10^{10}$  Па,  $\sigma_{0,2} = 420$  МПа) при относительном удлинении  $\delta = 7\%$  и ширине полки  $b = 10...50$  мм. При этом внутренний радиус уголковой зоны на предыдущем переходе равен  $r_{i-1} = 3,2$  мм, коэффициент запаса материала на одну зону сгиба  $k = 0,7$  [2], радиус уступа  $R = 50$  мм при диаметре рабочих валов  $\phi 65$  мм (рис. 2). Критические напряжения  $\sigma, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (рис. 7) соответственно для внутренних радиусов зоны сгиба в рассматриваемом переходе  $r = 1,0$  мм,  $r_1 = 1,5$  мм,  $r_2 = 2,0$  мм,  $r_3 = 2,5$  мм. Предельные режимы формообразования уголковой зоны торцевыми силами тангенциального поджатия определяем, сравнивая минимальные критические напряжения, при которых еще нет потери устойчивости зоны передачи усилий (23), тогда:

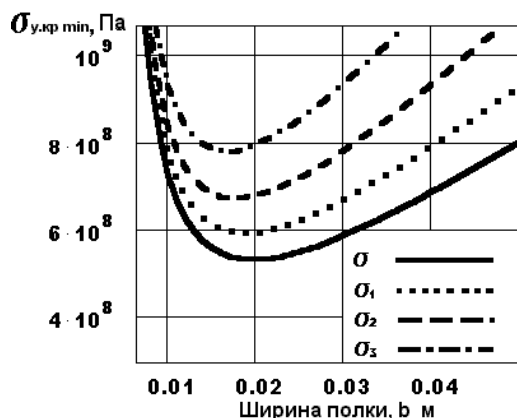


Рис. 7. График зависимости критических напряжений сжатия  $\sigma_{y.kp \min} = f(b, r)$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_s \cdot [(1-r_i^2/(r_i+s_0)^2)] \cdot [0,5 \cdot (1-r_i^2/(r_i+s_0)^2) \cdot \bar{B}_i + 2 \cdot (r_i+0,5s_0)^2 \cdot \Sigma_i / (r_i+s_0)^2]^{1,5}}{\sqrt{3} \cdot [2 \cdot (1-r_i^2/(r_i+s_0)^2) / \pi]}$$

$$\bar{B}_i = [1 + ((\eta + 0,5s_0)^4 / ((r_i + s_0)^2 \cdot r_i^2))] \cdot (2 + \pi^2 / 8\alpha^2);$$

$$\Sigma_i = (2 - \pi^2 \cdot 8\alpha^2) \cdot \ln((r_i + s_0) / r_i);$$

$$\sigma_i = \sigma_{y.kp \min} \quad (24)$$

Решая уравнение (24) в системе UNIGRaphics, получим значения минимальной толщины полки, еще не теряющей устойчивость, в зависимости от следующих технологических параметров (рис. 8а): ширины полки  $b$ ; внутренних радиусов зоны сгиба на рассматриваемом  $r_i$  и предыдущем  $r_{i-1}$  переходах; диаметра уступа, передающего усилия сжатия  $R$ ; основных диаметров нижних валков актуального  $D_i$  и предыдущего переходов  $D_{i-1}$ ; механических свойств формируемого материала  $E, \sigma, \delta$ .

Если толщина заготовки находится в зоне отсутствия гофрообразования (рис. 8а, заштрихованная область), то достаточно одного окончательного перехода, для формообразования. Величина осадки торца за один окончательный переход определяется зависимостью (2) (рис. 8б), а при исследовании и анализе зависимостей (12), (14), (16), (23) формулируется вывод, что для интенсификации процесса изготовления кондиционных тонкостенных профилей гибкой - прокаткой в валковых парах с тангенциальным сжатием по торцам заготовки предопределяется: минимально возможный радиус уступов  $R$ ; аксиальный натяг заготовки между технологическими переходами; распределение суммарной осадки торцов на несколько переходов; закрытые рабочие калибры валковых пар и др.

*Исследование процесса формообразования профилей на устойчивость сжатых полок расположенных горизонтально или наклонно в рабочем калибре окончательного перехода предопределяет решение следующих технологических проблем:*

1. Загибка кромки полки из-за давления на краевой элемент радиусным элементом валковой пары еще до осевой плоскости валков (до захода в рабочий калибр) (рис. 9 и рис. 10).

2. Выдавливание в посадочные элементы валковой пары излишка металла из рабочего калибра, обусловленное избытком ширины заготовки или наличием на заготовке заусенцев высотой более 0,2 - 0,5 мм. При этом процесс гибки-прокатки неустойчив и возможны остановки проката и даже поломка роликовой оснастки в случае попадания заготовки между вертикальными посадочными элементами валков.

3. Кромковая волнистость возникает при потере устойчивости сжатой в поперечном направлении полки распределенным на длине зоны

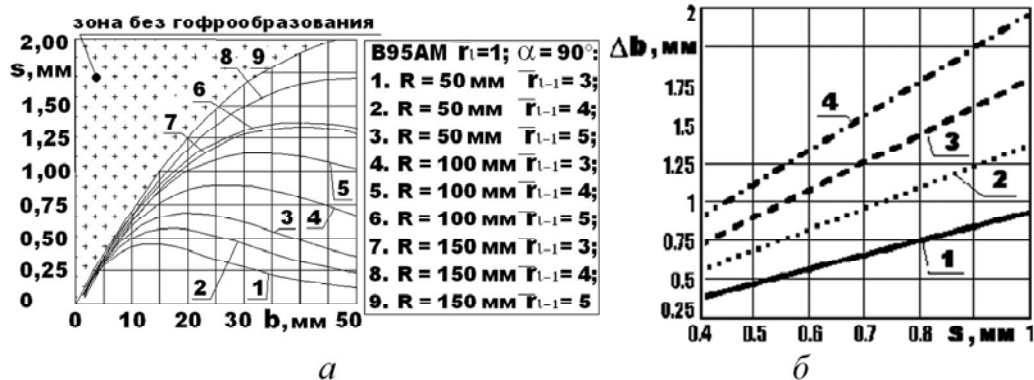


Рис. 8. Графическое определение предельных режимов осадки (а); величина осадки торца заготовки для отформовки одной зоны сгиба

$$r_t = 1: 1 - r_{t-1} = 2; 2 - r_{t-1} = 3; 3 - r_{t-1} = 4; 4 - r_{t-1} = 5 \text{ (б)}$$

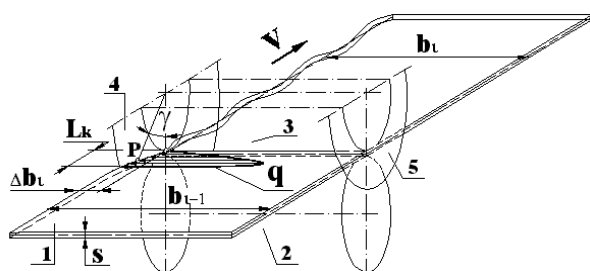


Рис. 9. Механизм возникновения кромковой волнистости (дробления кромки) на горизонтальных сжимаемых полках

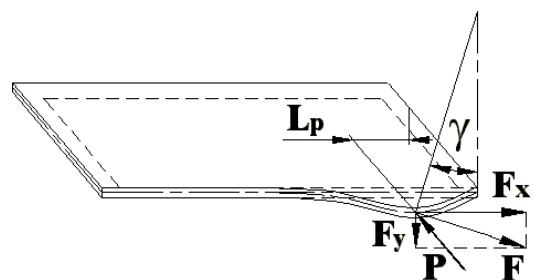


Рис. 10. Силовая схема нагружения горизонтальной полки в валковом калибре

контакта  $L_k$  усилием  $q$ . Зона контакта распространяется от осевой плоскости рассматриваемой валковой пары (в обратную сторону от направления профилирования) и зависит от величины осадки кромки полки за проход  $\Delta b$  и геометрических параметров валков актуального перехода:  $R_n$  – радиуса посадочного элемента,  $R_b$  – радиуса элемента полки и  $R_z$  – радиуса заходного радиуса. При увеличении длины контактной зоны  $L_k$  уменьшается влияние закрепления полки на осевой плоскости валков из-за смещения точки приложения равнодействующей распределенных усилий  $q$ , ввиду чего значения критических нагрузок уменьшаются. Следовательно, допустимое усилие торцевого поджатия ограничивается по верхнему пределу величиной осадки торца полки, механическими свойствами заготовки, геометрическими параметрами сжимаемой полки и валковой оснастки.

#### 4. Дробление кромки (дрожание).

Для расчетов предельной величины осадки за проход  $\Delta b$  используем выражение (2).

Алгоритм определения оптимальных режимов формовки тонкостенных профилей на переходах предварительного формообразования для практического применения и адаптации теоретических исследований. Разработан комплекс программ в системе UNIGRaphics для расчета

схем формовки и гибки в валках тонкостенных профилей на технологических переходах предварительного и окончательного формообразования. Для простоты управления и настройки комплексом программ, каждая из которых производит расчет основных характеристик, необходимых для установления предельных режимов формообразования, не допускающих гофрообразования, программы связаны между собой через входные и выходные параметры при помощи алгоритмов (рис. 10).

Факторные параметры для расчетов схемы формообразования на предварительных технологических переходах (параметры поперечного сечения требуемого профиля – максимальная ширина подгибаемых элементов  $b$ ; параметр гибочно-прокатного оборудования – межклетьевое расстояние  $A$ ) используются для определения геометрии поверхности плоской подгибаемой полки, где  $\alpha$  – угол подгибки за данный переход. Или для моделирования очага деформации криволинейной подгибаемой полки, в плане представляющие собой круговые секторы (рис. 11) (5) –  $\Delta \alpha(x, \Delta b)$  – в трехмерном виде, или (7) –  $\Delta \alpha(x)$  – по кромке. Для моделирования очага деформации многоэлементной подгибаемой полки используются – ширина каждого элемента и угол подгибки каждого элемента полки, в частности для двухэлементной полки, состоя-

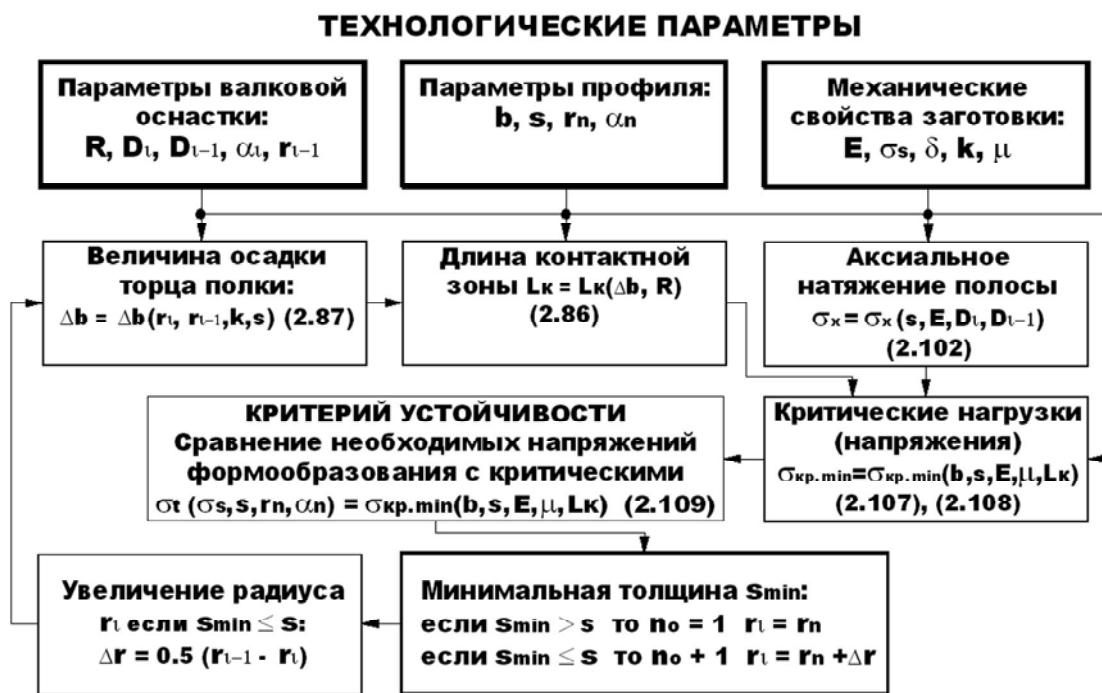


Рис. 11. Алгоритм расчетов предельных режимов осадки тонких краевых элементов профилей на переходах окончательного формообразования

щей из элементов шириной  $b_1$  и  $b_2$ , или обобщенное выражение для  $n$ -го числа элементов.

Далее определяется положение критического сечения координатой  $x_{кр}$ : для плоской полки, для криволинейной полки.

После определения максимальных продольных деформаций (в критическом сечении), определяются продольные остаточные деформации растяжения после формообразования профиля подгибкой на рассматриваемом технологическом переходе: для плоской полки; для многоэлементной полки; для криволинейной полки. Здесь используются механические свойства профилируемого металла –  $E, \sigma_s$ .

В дальнейшем находятся средние интегральные значения продольных остаточных деформаций, необходимые для формулировки критериев устойчивости отформованных краевых элементов: для плоской полки; для криволинейной полки (19).

Энергетические критерии устойчивости определяют предельные деформации растяжения, при которых еще не возникает потеря устойчивости рассматриваемых элементов с заданными геометрическими параметрами (в том числе и толщина заготовки –  $s_0$ ): для плоской отформованной полки; для криволинейной полки в виде кругового сектора (18).

Для определения предельных углов подгибки за технологический переход: для плоских полок решается система, состоящая из уравнений (7), (16), (17), (18), (19) и (20), также относительно  $\alpha$ . Для многоэлементных полок опре-

деляющим фактором предельного режима формообразования является устойчивость краевого элемента. В случае двухэлементной полки таким является периферийный элемент  $b_2$ . Для определения критического угла подгибки необходимо решить систему из уравнений при подстановке в них параметров  $b_1$  и  $b_2$ . Условие устойчивости криволинейной полки (18) является общим и при малом параметре кривизны подгибаемой полки  $K < 12$ .

Далее исследуются оценочные модели по определению амплитуды кромковой волнистости  $\omega_m$  в случае превышения предельных режимов формообразования профилей с плоскими подгибаемыми элементами и амплитуды периодических изломов для криволинейных подгибаемых полок [равенство зависимостей (19) и (25)]. Доказано, что в обоих случаях профили прямолинейны. Для нахождения амплитуд гофрообразования в первом случае необходима длина периода волнистости –  $T$ , во втором случае кроме  $T$  – периода следования изломов необходима длина излома –  $\ell$ .

По схеме алгоритма приводится порядок вычислений для нахождения продольной кривизны симметричного профиля с плоскими полками (швеллера) –  $R_y$  (или прогиба профиля на одном погонном метре длины –  $\omega_y$ ) в предположении полной разгрузки остаточных деформаций растяжения.

Также для асимметричного профиля (Z-образный профиль с одинаковыми полками) нахо-



дятся углы крутки  $\varphi_{п.м}$  от остаточных деформаций растяжения. Последние характеристики отклонений формы профилей (поводки) требуются для проверки теоретических расчетов остаточных деформаций элементов профилей в экспериментальных исследованиях.

Входные и выходные данные выделены в алгоритме жирными рамками (рис. 11).

По результатам исследований, разработан алгоритм определения оптимальных режимов формовки тонкостенных профилей на переходах окончательного формообразования, который используется и для расчетов схемы формообразования на окончательных переходах (рис. 10):

- геометрические параметры требуемого профиля – ширина подгибаемых элементов  $b$ , толщина заготовки –  $S_0$ , внутренние радиусы зон сгиба  $r_n$ , углы между краевыми и смежными элементами  $\alpha_n$  (рис. 2, рис. 3);

- геометрические параметры валковой оснастки и формируемого профиля – радиусы уступов передающих сжимающие усилия  $R$ , основные катающие диаметры по нижним роликам на актуальном  $Di$  и предыдущем переходах  $Di-1$ , радиусы зон сгиба профилируемой заготовки на актуальном  $i$  и предыдущем  $i-1$  переходах (рис. 2, рис. 3);

- механические свойства заготовки  $E, \sigma_s, \delta, k, \mu$ .

Величина осадки  $\Delta b$  определяется равенством (2) (рис. 3). Длина контактной зоны выражается зависимостью (1). Аксиальное натяжение полосы в межклетьевом промежутке (17), (18) (рис. 6).

Критерий устойчивости формируется аналитическими равенствами, которые также решают задачу определения минимально допустимой толщины заготовки  $s_{min}$ , при заданных входных параметрах (рис. 8а), и сравнивают ее с заданной толщиной  $s_0$ , а также определяют требуемое количество переходов окончательного формообразования для бездефектного формообразования зоны сгиба с заданным конечным внутренним радиусом  $r_n$ . Оптимизируя параметры, производится уменьшение радиуса на шаг, равный  $\Delta r = 0,5(r_{i-1} - r_i)$ , и снова производится расчет до выполнения условия  $s_{omin} \geq s_0$ . Таким образом, определяются параметры роликовой оснастки для окончательных переходов по их количеству для достижения минимальных радиусов зон сгиба и недопущения гофрообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марковцев В.А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления листовых профилей авиационных конструкций методом стесненного изгиба. Дисс... канд. техн. наук. М., 1991. 202 с.
2. Поскуряков Г.В. Стесненный изгиб // Авиационная промышленность. 2006. № 2. С. 9-13.
3. Комаров А.Д., Барвинок В.А., Моисеев В.К., Хромова Е. А. Пружинение прямолинейных бортов при стесненном изгибе листовых деталей эластичной средой // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2000. № 3. С. 46-48.
4. Скрипачев А.В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах. М.: Машиностроение, 2006. 367 с.

## ANALYTICAL THE SCHEDULE METHODS AND PROCEDURES OF MODELLING OF PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MANUFACTURE BENT OF STRUCTURES ON TECHNOLOGICAL TRANSITIONS

© 2011 P.M. Popov<sup>1</sup>, F.E. Ljashko<sup>1</sup>, S.G. Ryzhakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute Aviation Technologies and Management,  
Ulyanovsk State Technical University

<sup>2</sup> Ulyanovsk Branch of Design Office of Open Society "Tupolev"

In clause authors offer and decipher the qualifier of schemes of the appendix of face effort on final transitions of technological process of manufacturing of structures; models of the compressed shelf; changes of parameters of an angular zone at structures with the power settlement scheme of compression of a shelf; dependences of critical pressure of compression. Develop mathematical models of these processes and the phenomena for the purpose of perfection of technological processes of manufacture thin structures. Represent analytical the schedule models and paint the mechanism of occurrence sinusitis.

Key words: analytical the schedule methods, procedures of modelling, technological processes, structures

*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.*  
*Stanislav Ryzhakov, Candidate of Technics, Deputy Chief Designer, Director. E-mail: ufkbtu@mv.ru.*