УДК 519.7/681.3

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКИХ ГНУТОЛИСТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

© 2011 И.А. Попов[1], И.В. Антипова[2], В.П. Махитько[2], М.В. Савин[2]

[1] ФНПЦ ОАО “НПО “Марс””, г. Ульяновск
[2] Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье авторы представляют алгоритм автоматизированного проектирования параметров производственно-технологического процесса формообразования тонких гнутолистовых профилей в адаптированной под процессы исследуемого предприятия на примере UNIGRAphics; подробно расписывают его по элементам графоаналитической модели с интерпретацией математических моделей, реализующих признаки САПР параметров технологического процесса.
Ключевые слова: автоматизированное проектирование, алгоритм, формообразование, профили, графоаналитическая модель.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов автоматизации проектирования технологических процессов формообразования тонких гнутолистовых профилей рассмотрим процедуру организации *алгоритма проектирования параметров и переходов* технологического процесса их производства (рис. 1).

Алгоритм с математическими моделями адаптирован в проектно-технологической информационной системе и поставлен на поддержание в UNIGRAphics.

Работу алгоритма автоматизированного проектирования и оптимизации параметров технологического процесса формообразования гнутолистовых профилей в системе UNIGRAphics с полным информационным тезаурусом по конструкции и технологии самолёта, сформулируем по следующей логической схеме:

1. Принимается, что показатели анизотропии μ_{ij} (i – направление нормали к площадке, j – направление действия силы) удовлетворяют соотношениям $\mu_{31} = \mu_{32} = 1 - \mu_{12} = \mu_{21}$; $\mu_{23} = \mu_{13} = 0{,}5$. Переход к блоку 2.

2. Определяется энергия деформирования уголковой зоны $W_{\text{δä}} = \sigma_1 S^2 \alpha(x_3)/4$. Переход к блоку 3.

Далее вычисляется энергия разгибки уголковой зоны:

$$W_{\partial} = \sigma_1 S_0^2 \alpha(x_3)(1 - r_1^h / r_1),$$

где σ_1 – предел текучести материала в направлении x_1, МПа; S_0 – толщина исходной заготовки, мм; α (x_3) – угол подгибки заготовки, град; r_1^h, r_1 – радиусы заготовки в зоне сгиба после осадки и при свободном формообразовании соответственно, мм. Для этого рассматривается уголковая зона на текущем переходе. Если верхний ролик перехода изготовлен так, что развертка калибра меньше развертки заготовки, то осуществляется переход к блоку 4, если развертка калибра больше, то переходим к блоку 35.

3. Вычисляется энергия разгибки полки для очередного перехода по формуле

$$W_{\delta} = \sigma_1 S_0^2 \alpha(x_3)(1 - r_k^h / r_{k-1})/4,$$

где r_k, r_{k-1} – радиусы кривизны, если C_k не превышает критической величины, при которой наступает локальная потеря устойчивости заготовки равенство не сходится, то осуществляется переход к блоку 5, если превышает, то переходим к блоку 28.

4. С учетом формул:

$$W = W_{уч} + W_p + W_3 + W_a;$$

$$W_{\text{δä}} = \sigma_1 S_0^2 \alpha(x_3)/4;$$

$$W_{\delta} = \sigma_1 S_0^2 \alpha(s_3)(1 - r_1^h / r_1),$$

где σ_1 – предел текучести материала в направлении x_1, МПа; S_0 – толщина исходной заготовки, мм; α (x_3) – угол подгибки заготовки, град; r_1^h, r_1 – радиусы заготовки в зоне сгиба после осадки и при свободном формообразовании соответственно, мм;

Попов Илья Андреевич, аспирант.
Антипова Ирина Владимировна, декан факультета профессиональной подготовки и безотрывных форм обучения. E-mail: Iatung@rambler.ru.
Махитько Вячеслав Петрович, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика, управление и информатика».
Савин Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Самолетостроение»

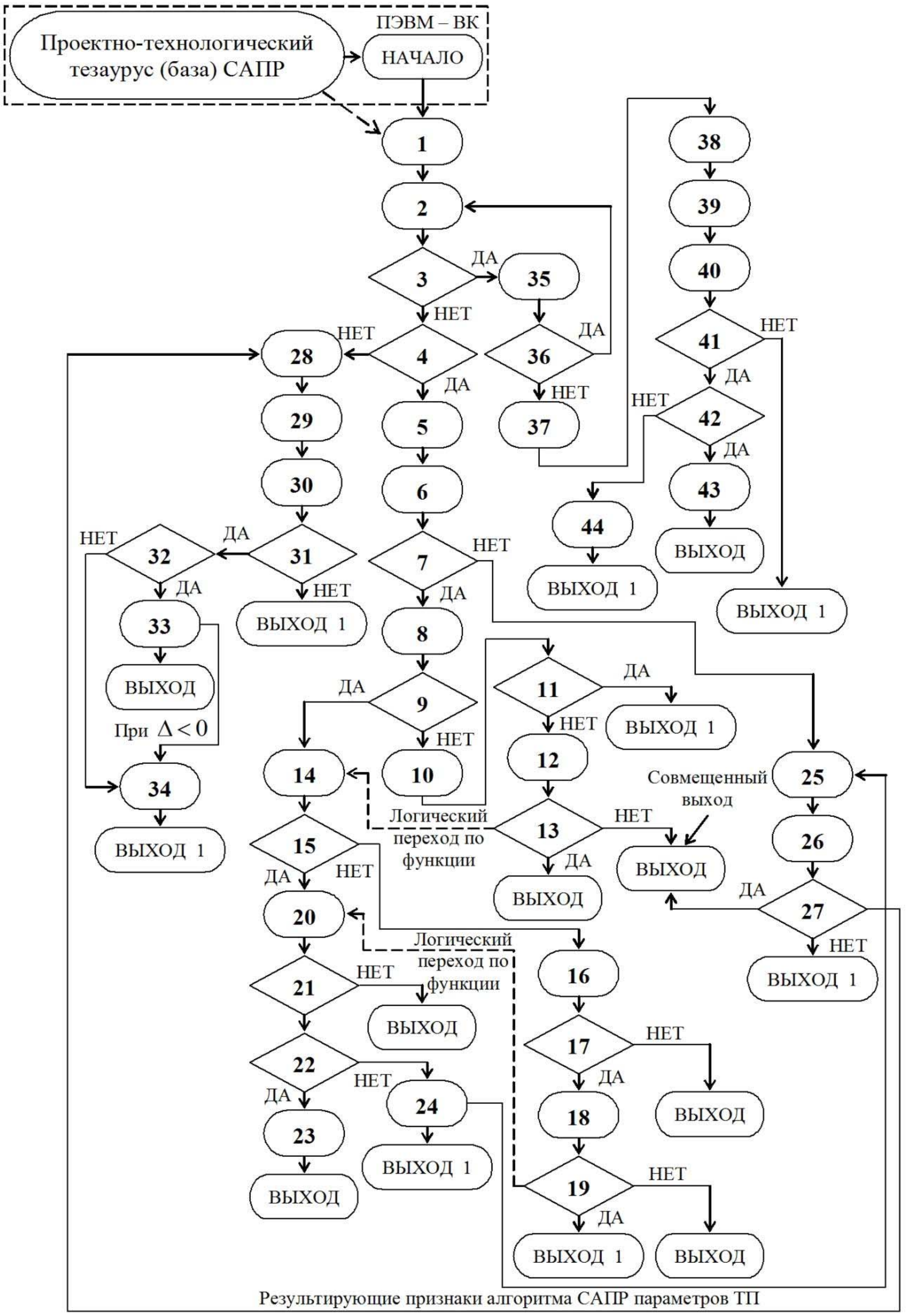

Рис. 1. Алгоритм автоматизированного проектирования параметров технологического процесса формообразования гнутолистовых профилей в системе UNIGRAphics

$$W_{\tilde a} = 0{,}5 S_0 \sigma_2 (d_\alpha / d_{x_3})^2 \cdot \int_0^{\tilde a} r^2 dr = \sigma_2 S_0 b^3 (dx/dx_3)^2 / 6,$$

где σ_2 – предел текучести в направлении x_3, МПа, после согласования данных;

$W_{\tilde a} = \sigma_2 (R_k / R_{k-1} - 1)(r_{k\alpha} + b) S_0$, где R_k, R_{k-1} – радиус ролика на актуальном и предшествующем переходах, мм; *в* – ширина полки, мм, вычисляется *суммарная энергия* по формуле:

$$W=\sigma_1 S_0^2\cdot\alpha(x_3)(2-r_k^h/r_{k-1})/4+$$
$$+\sigma_2 S_0 b^3(d\alpha/dx_3)^2/6+$$
$$+\sigma_2 S_0 r_k\alpha(R_k/R_{k-1})+$$
$$+\sigma_2 S_0 b(R_k/R_{k-1}-1).$$

После вычисления, производится переход к блоку 6.

5. Определяется длина зоны плавного перехода в межклетьевом промежутке L_K по математической модели вида:

$$L_K=\sqrt{\frac{8b^3\alpha_k}{3\left\{S_0\left(2-r_k^h/r_{k-1}\right)/\sqrt{0{,}5/(1-\mu_{12})}+4r_k\left(R_k/R_{k-1}-1\right)\right\}}},$$

после расчета на ПЭВМ, производится переход к блоку 7.

6. Проверяется зависимость текущего угла подгибки полки $\alpha_л$ (в соответствии с математической моделью по п. 5 алгоритма) по формуле:

$$\alpha_k\angle 3L^2\left\{S_0^*\left(2-r_k^h/r_{k-1}\right)/\sqrt{0{,}5(1-\mu_{12})}+\right.$$
$$\left.+4r_k^*\left(R_k/R_{k-1}-1\right)\right\}\ /\left(8b^3\right).$$

Если условие соблюдается, осуществляется переход к блоку 25, если нет, то производится переход к блоку 8.

7. Вычисляются продольные деформации растяжения в очаге с текущим углом $\alpha\ (x)$ по формуле $d\left[d\alpha(x)/dx\right]dx=0;$ определяется $\varepsilon_{ост}=\varepsilon-\sigma_S/E.$ Далее переход к блоку 9.

8. Определяются критерии (нормы) устойчивости плоской полки с разработкой математических моделей для определения продольных остаточных деформаций. Определяется функция прогиба отформованной полки по формуле $\omega=\alpha\omega_1(x,y),$ где α – бесконечно малый параметр, не зависящий от координат; ω_1 – конечная функция координат; переход к блоку 10.

9. Определяется ω_1 - по формуле $\omega_1=\sin 2\pi x/T\cdot\sin\pi y/2b,$ где T – длина периода волнистости, причем $T=2b$ пластина разбивается на целое число квадратов по формуле:

$$A_2=-S_0/2\cdot\iint_S\left(\sigma_x\varepsilon_x+\sigma_y\varepsilon_y\right)dxdy$$

и вычисляется сумма работ внутренних сил V_1+V_2 и внешних сил A_1+A_2, а также вычисляется двойной интеграл по формуле:

$$a^2\iint_S\left[W+S_2/2\left(\sigma_x\varepsilon_x+\sigma_y\varepsilon_y\right)\right]dx=0$$

и потенциал моментов W. Далее переход к блоку 11.

10. Вычисляется "цепь" деформируемой полки по усреднениям e_x и e_y, с приращениями напряжений от изгибающих моментов σ_x и σ_y по математической модели:

$$\sigma_x-\sigma_y/2=\sigma_i\left(\varepsilon_x-z\chi_x\right)/\varepsilon_i;\sigma_y-\sigma_x/2=\sigma_i\left(\varepsilon_y-z\chi_y\right)/\varepsilon_i.$$

При определении σ_x и σ_y осуществляется переход к блоку "ВЫХОД1". Если σ_x и σ_y имеют отрицательную величину, то осуществляется переход к блоку 12, расчет дублируется через контроль параметров технологического процесса.

11. Вычисляется M_x по математической модели вида:

$$M_x=\int_{-S/2}^{+S/2}\sigma_x zdz=-S_0^3\sigma_i\left(2\chi_x+\chi_y\right)/18\varepsilon;$$

$$M_y=\int_{-S/2}^{+S/2}\sigma_y zdz=-S_0^3\left(2\chi_y+\chi_x\right)/18\varepsilon$$

через контроль технологического процесса (ТП), а также параметры $\Omega,\vartheta,\Im_1,\Im_2,\Im_3$ по формуле

$$a^2\iint_S\left\{-\frac{S_0^3}{9}\cdot\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\left(\chi_x^2+\chi_x\chi_y+\chi_y^2\right)+\frac{S_0}{2}\left(\sigma_x\varepsilon_x+\sigma_y\varepsilon_y\right)\right\}dx=0.$$

Структурируется выражение вида:

$$a^2\iint_S\left\{-\frac{S_0^3}{9}\cdot\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\left[E+\left(\frac{\pi}{b}\right)^2\Im_1+\vartheta\right]+\left[\frac{S_0\sigma_i}{2}\cdot\frac{1}{2}\Im_2+\frac{1}{4}\Im_3\right]\right\}ds=a^2\psi=0,$$

а по программе "MAX" данного алгоритма, в результате чего вышестоящее уравнение превращается в систему уравнений вида:

$$\begin{cases}E=\left(\dfrac{\pi}{b}\right)^4\sin^2\dfrac{\pi x}{b}\cdot\sin^2\dfrac{\pi y}{2b}\\ \Im_1=\left(\dfrac{\pi}{2b}\right)^2\sin^2\dfrac{\pi x}{b}\cdot\sin^2\dfrac{\pi y}{2b}\\ \vartheta=\left(\dfrac{\pi}{2b}\right)^4\sin^2\dfrac{\pi x}{b}\cdot\sin^2\dfrac{\pi y}{2b}\\ \Im_2=\left(\dfrac{\pi}{b}\right)^2\cos^2\dfrac{\pi x}{b}\cdot\sin^2\dfrac{\pi y}{2b}\\ \Im_3=\left(\dfrac{\pi}{2b}\right)^2\sin^2\dfrac{\pi x}{b}\cos^2\dfrac{\pi y}{2b},\end{cases}$$

где E – постоянная составляющая пластической области; ϑ – постоянная угла подгибки; $\Im_i$ – постоянная смещения пластических волокон в углах подгибки.

Далее вычисляется параметр по формуле:

$$\psi=-D_1/b^2+\left(D_{2/2}+D_3\right)\ln b=0,$$

затем производится переход к блоку 13.

12. Проверяется условие устойчивости для объединения геометрических параметров заго-

товки, очага деформации и интенсивность деформации по математической модели $1{,}33\pi^3 S_0^2 \cdot (\varepsilon_i b^2)^{-1} + \ln b = 0,$ а ε_I по формуле $\varepsilon_i = b^{-1} \int_0^b \varepsilon_{ост}(\rho) d\rho.$ Если вычислительная цепь сходится, то переходим к блоку “Выход”. Если имеются несовпадения, то логический переход по функции к блоку 14.

13. Задается функция прогиба кромки полки от недеформированного состояния $\omega(x) = \omega_M \sin(2\pi x/T)$ по математическим моделям:

$$\varpi(x) = \omega_M \cdot \sin(2\pi x/T),$$

где w_M – амплитуда краевой волнистости (по кромке), а x – продольная координата; T – период волнистости;

$$\omega_M = (T/\pi) \cdot \left[0{,}5b^2 (\beta_1 \partial(\arcsin[\sin(\alpha) \cdot [(t + C_1) \cdot cht + \right.$$
$$\left. + (C_4 \cdot t - 1) \cdot sht]]) / \partial t)^2 - \sigma_S / E\right]^{0,5}.$$

Вычисляется длина растянутой полки l на длине перехода T по формуле:

$$\ell = \int_{-0,5T}^{+0,5T} \sqrt{1 + [\omega'(x)]^2 dx}.$$

Далее вычисляется ℓ по формуле:

$$\ell = T\left[1 + 0{,}25\omega_M^2 \cdot \pi^2 \cdot T^{-2} + 4{,}68 \cdot 10^{-2} \cdot \omega_M^4 \cdot \pi^4 \cdot T^{-4}\right]$$

и $\varepsilon_i = (\pi\omega_M / 2T)^2$, далее переход к блоку 15.

14. Анализируются углы подгибки по временным параметрам через гиперфункцию $ch(t) = (e^t + e^{-t})/2; sh(t) = (e^t - e^{-t}); th(t)/ct(t)$ и др. для определения амплитуды кромковой волнистости и остаточной деформации

$$\varepsilon_e b^{-1} \cdot \int_0^b \varepsilon_{ост}(\Delta b) d\Delta b,$$

где Δb – текущее положение точки на дуге кругового сектора криволинейной полки, затем осуществляется переход к блоку 16.

15. Проверяются дополнительно величины – параметры $\omega, \Delta\ell, \ell_k, \Delta\ell_H$ по математическим моделям:

$$\omega = \omega_M \cdot \exp(a^2 x^3),$$

где $a = 2\ell^{-1}$ – коэффициент затухания функции прогиба при удалении от $x=0$;

$$l_k = \left[\int_{-l/2}^{+l/2} \left[1 + \left(d\left[\omega_M \exp(-a^2 x^2)\right] / dx\right)^2\right]^{0,5} dx\right],$$

а на единице длины профиля общая длина кромки волн с количеством $n = T^1$:

$$\sum \ell_H = \ell_k \cdot n = \ell_k \cdot T^1,$$

где общая длина на единице длины невозмущенных частей кромки равна: $\sum \ell_H = 1 - \ell \cdot T^1$, где в итоге проверяется относительная деформация по кромке $\varepsilon_{ост}$ по формуле

$$\varepsilon_{ОСТ} = T^{-1}\left[\int_{-l/2}^{+l/2} \left[1 + \left(d\left[\omega_M \exp(-a^2 x^2)\right] / dx\right)^2\right]^{0,5} dx - l\right].$$

Далее моделируется графоаналитическая модель и вычисляются ω_y, L, R_y и ε_A, осуществляется переход к блоку 17.

16. Анализируется поводка равнополочных швеллеров после профилирования и если поводка не обнаружена, то переход к блоку “Выход”, а после проверки крутки асимметрического профиля. Если крутки нет, то осуществляется переход к блоку 18.

17. Вычисляется центр тяжести эпюры распределения продольных деформаций растяжения с учетом центрального угла Θ, остаточной деформации $\varepsilon_{ост} = \varepsilon_{ост}(\Delta b)$ и Δb_B по формуле:

$$\int_{\Delta b_0}^{\Delta b_B} \varepsilon(\Delta b) d\Delta b = \int_{\Delta b_B}^{b} \varepsilon(\Delta b) d\Delta b,$$

где Δb_B – расстояние от сопряжения уголковой зоны с плоским подгибаемым элементом до центра тяжести эпюры распределения остаточных деформаций; далее определяется r по формуле:

$$r = \left[(0{,}5b_1 + R \cdot \sin\Theta_B)^2 + (R^2 \cdot \cos^2\Theta_B)\right]^{0,5},$$

где $\Theta_B = \Delta b_B \cdot R^{-1}$ - угол местоположения точки B на круговом секторе; b_1 – ширина плоского (не подгибаемого) участка. Вычисляются параметры X, L и $\varphi_{ПМ} = r^{-1} \cdot \left[(\varepsilon_{ост} + 1)^2 - 1\right]^{0,5}$; осуществляется переход к блоку 19.

18. Моделируется угол крутки Z-образного профиля после отформовки и вычисляется L_k и ΔB по формулам:

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

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 $i-1$;

$$\Delta B = 2(r_{i-1} - r_i)(1 - \pi/4) + kS_0,$$

а 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; ΔB_3 – избыток (превышение) ширины заготовки по сравнению с разверткой сечения готового профиля; n – количество зон сгиба на профиле; S_0 – толщина исходной заготовки. Далее осуществляется переход к блоку “ВЫХОД-1”.

19. Вычисляется сила тангенциального сжатия P по формуле: $P = L_k \cdot gy$ с ограничениями для краев пластины при:

$x = 0$ (шарнирное закрепление) $\omega = 0$; $\partial^2\omega / \partial x^2 = 0$

и

$y=0$ (защемление) $\omega = 0; d\omega / dy = 0$

для линеаризации $M[\omega]$ по формуле

$$M[\omega] - PL[\omega] = 0,$$

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; μ - коэффициент Пуассона; $L[\omega]$ - дифференциальное выражение вида:

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

$\overline{T}_x^0 = \overline{T}_x^0(x,y); \overline{T}_y^0 = \overline{T}_y^0(x,y); \overline{S}_0^0 = \overline{S}_0^0(x,y)$ – распределение начальных единиц внутренних сил в срединной плоскости пластины (при $P=1$), а при $P = 1; T_x^0 = S^0 = 0; T_y^0 = -q_y$ (сжатие) это уравнение принимает вид:

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

Далее переход к блоку 21.

20. Проверяется равенство суммы ω по формуле:

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

где $i=1,\ldots,m$ и на основе математической модели вида $\omega(x,y) = C_i f_i(x,y)$ определяется полуволна L по модели

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

на основе интегрирования уравнения $\int_0^a\int_0^b Lf_1(x,y)dxdy = 0.$ Это уравнение вытекает в результате умножения ошибки по функции L на базисную функцию $f_1(x,y)$ при интегрировании по всей площади полки при условии, что действие распределенной нагрузки q_y ограничено пределами $x \in [0; L_k]$ и $y \in [0; b]$. Далее осуществляется переход к блоку “ВЫХОД”. Если в результате упрощения выражение вида:

$$\frac{1}{2}L_1\left\{Da\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^4 b + \left(\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2\right)^2 \frac{b}{2}\right] - \\ - q_{кр}\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \frac{a}{2\pi}\left(\frac{2\pi L_k}{a} - \sin\left(\frac{2\pi L_k}{a}\right)\right)\frac{b}{2}\right\} = 0$$

не сходится, то осуществляется переход к блоку 22.

21. Анализируется приближенное значение критических соотношений внешних нагрузок $q_{кр}$ по модели

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

и математической модели:

$$q_{кр} = 4\pi D\left\{(\pi/a)^4 + 1/2\left[(\pi/b)^2 - (\pi/a)^2\right]^2 + \\ + 2(1-\mu)(\pi/b)^2(\pi/a)^2\right\}$$

или

$q_{кр} = (\pi/b)^2\left[2\pi L_k/a - \sin(2\pi L_k/a)\right]$ при условии сходимости $q_y(x)$ по формуле $q_y(x) = q_{y0}\left[1-\cos(2\pi x/L_k)\right]$, то осуществляется переход к блоку 23, если же $q_y(x)$ по формуле не сходится, то осуществляется переход к блоку 24.

22. Проверяется расчет сходимости уравнений по индексам L и L_1 (в переходе 20), если сходимость существует, осуществляется переход к блоку “ВЫХОД”.

23. Проверяется наличие полной потенциальной энергии

$$\Delta Э = U_\chi - P_y S^{-1}\int_0^b \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^2_{x=L_k/2} dy.$$

Вычисляется энергия изгиба полки U_x и при условии $\Delta Э=0$, вычисляется

$$P_y = \frac{Dads}{(\pi/b)^4 b\sin^2(\pi L_K/2a)} \times$$
$$\times\left\{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^4 + 2(1-\mu)\left(\frac{\pi}{b}\right)^2\left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right\},$$

далее переходим к блоку 25.

24. Моделируются и проверяются по результатам исследований зависимости критических напряжений сжатия, а также определяется напряжение аксиального натяжения полосы. Вычисляется $\sigma_x = E\varepsilon_x$ по формуле

$$\sigma_x = E\cdot\varepsilon_x E\left(D_i - D_{i-1}\right)/D_i = E\,\Delta D/D_i\ ,$$

где D_i и D_{i-1} – основные диаметры нижних валков актуального (окончательного) и предыдущего переходов. Затем переход к блоку 26.

25. Вычисляются значения равномерно (по результатам исследований), распределенных по ширине полки продольных (аксиальных) нагрузок растяжения q_x по модели

$$q_x = \sigma_x S_0 = S_0 E\left(D_i - D_{i-1}\right)/D_i$$

и определяется силовая расчетная при исследовании, схема сжатой полки при аксиальном натяге в направлении оси *OX*. Вычисляется бифуркационное перемещение ω по формуле

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

где α – независящий от координат бесконечно малый параметр; ω_1 – конечная функция координат. Далее переход к блоку 27.

26. Проверяется энергетический критерий Брайна по формуле $\delta(\Delta Э) = 0,\ \Delta Э$ - изменение полной потенциальной энергии, тоже по формуле

$$\Delta Э = U_\chi + \int_0^a\int_0^b T_x^0 \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\right)^2 dxdy +$$
$$+\int_0^{L_k}\int_0^b T_y^0 \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^2 dxdy,$$

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:

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

далее осуществляется переход к блоку "ВЫХОД-1".

27. Энергия деформации изгиба U_z вычисляется через распределение начальных сил в срединной плоскости полки, далее переход к блоку 29.

28. Вычисляем и уточняем выражения для определения критической распределенной нагрузки сжатия по математической модели вида:

$$q_{у.кр.} = \pi\frac{2\pi^2 D\left[b^{-2} + 3b^2a^{-4} + (2-4\mu)a^{-a}\right] + 6b^2a^{-2}q_x}{\left[2\pi L_k/a - \sin(2\pi L_k/a)\right]},$$

с моделированием графика зависимости критических напряжений сжатия $\sigma_{укр.\min} = f(b, r)$, а далее вычисляются σ_t, $\overline{B}_i$ и $\sum_i$ по известным формулам. Переход к блоку 30.

29. На основе исследований моделируется и строится графоаналитическая модель для определения предельных режимов осадки, а также величина осадки торца заготовки для отформовки одной зоны сгиба r_ℓ и $r_{\ell-1}$. Вычисляется зона гофрообразования и формулируются рекомендации (расчетные – в виде логической цепи), если процесс идет, далее переход к блоку 31.

30. Проверяется механизм возникновения кромковой волнистости (дробления кромки) на горизонтальных сжимаемых полках. Проектируются графоаналитическая модель и параметры техпроцесса формообразования; тогда переход к блоку "ВЫХОД-1". Если имеются отступления от результатов экспериментальных исследований, то есть параметры не совпадают с расчетными, то осуществляется переход к блоку 32.

31. Анализируется силовая схема нагружения горизонтальной полки в валковом калибре. Если нагрузка отвечает критерию, то есть положительная (Δ>0), то осуществляется переход к блоку 33, если отрицательная (Δ<0), то переход к блоку 34.

32. Анализируются все математические модели, занесенные в алгоритм (рис. 1) по единой технологической цепи оптимизации параметров технологического процесса формообразования гнутолистовых профилей. Множество математических моделей – оптимизировано, далее переход к блоку "ВЫХОД"; если есть ошибка в расчетах, производится корректировка в блоке 34, то есть осуществляется переход к блоку 34.

33.Моделируется алгоритм расчетов предельных режимов осадки тонких краевых элементов профилей на переходах окончательного формообразования. Если алгоритм совпадает с расчетным, полученным при исследовании, то осуществляется переход к блоку "ВЫХОД-1". Если алгоритм не совпадает с расчетным, то осуществляется переход к блоку 35.

34. По разделу "Технологические параметры", вычисляются параметры валковой оснастки: *R*, D_L, D_{L-1}, α_e, r_{e-1}; далее осуществляется переход к блоку 36.

35. В блоках 36 и 44 алгоритма моделируются параметры профиля: b, S_0, r_n, α_n; механические свойства заготовки: $E, \sigma_S, \delta, K, \mu_r$; на основе параметров валковой оснастки $R, D_L, D_{L-1}, \alpha_e, r_{e-1}$, рассчитывается величина осадки торца полки: $\Delta b = \Delta b(r_e, r_{e-1}, k, S)$; далее определяется длина контактной зоны $L_k = L_k(\Delta b, R)$; определяется аксиальное натяжение полосы $\sigma_x = \sigma_x(S_0, E, D_e, D_{e-1})$; на основе параметрических данных L_k и σ_x – определяются критические нагрузки (напряжения): $\sigma_{\hat{e}\partial \min} = \sigma_{\hat{e}\partial \min}(b, S_0, E, \mu, L_k)$, далее на основе $\sigma_{кр.min}$ производится релаксация критерия устойчивости методом сравнения необходимых напряжений формообразования с критическими $\sigma_l(\sigma_S, S_0, r_n, \alpha_n) = \sigma_{\hat{e}\partial .\min}(b, S_0, E, \mu, L_k)$. По результатам релаксации критерия устойчивости, вычисляется минимальная толщина S_{0min}: если $S_{0\min} > S_0$, то $n_0 = 1, r_e = r_n$; если $S_{0\min} \le S_0$, то $n_0 + 1, r_e = r_n + \Delta r$. Далее, предопределяется возможность увеличения радиуса r_e, если $S_{0\min} \le S_0 : \Delta r = 0{,}5(r_{e-1} - r_e)$ и на основании решения об увеличении (или об уменьшении) радиуса, производится корректировка величины осадки торца полки по параметрам $\Delta b = \Delta b(r_e, r_{e-1}, k, S_0)$. В вышеописанном алгоритме блоки с 36 по 44 выполнены в качестве дополнительной подсистемы для реализации (дублирования) проверки алгоритма расчетов технологических параметров технологического процесса формообразования гнутолистовых профилей. Математические модели алгоритма экспериментально апробированы в системах автоматизации и АСУП на действующем серийном исследуемом предприятии ЗАО "Авиастар-СП".

На основании вышеизложенного в процессе экспериментальных исследований и апробирования сформированного алгоритма автоматизированного проектирования технологических параметров процесса формообразования тонких гнутолистовых профилей, выяснена полнота исследований и уместности, проведенных экспериментов; в системе UNIGRAphics алгоритм вполне работоспособен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барвинок В.А., Моисеев В.К., КомаровА.Д.* Пружинение прямолинейных бортов при стесненном изгибе листовых деталей эластичной средой // Авиационная техника. 2007. № 3. С. 46-52.
2. *Куприн П.Н., Колганов И.М.* Влияние аксиального натяга полосы на устойчивость таких краевых элементов заготовки при их торцевом сжатии в роликовых парах окончательных переходов // Сборник научных трудов ИАТУ УлГТУ. Ульяновск: Венец, 2002. С. 123-129.
3. *Тюнин А.Н.* Разработка методов организации производства механообрабатываемых изделий на основе лингвистического описания графоаналитического тезауруса. Дисс... канд. техн. наук. 05.02.22 – "Организация производства (машиностроение)". Самара: СГАУ, 2011.

FORMATION OF ALGORITHM OF THE AUTOMATED DESIGNING OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESS FORMS OF FORMATION THIN BENT STRUCTURES

© 2011 I.A. Popov[1], I.V. Antipova[2], V.P. Mahitko[2], M.V. Savin[2]

[1] FNPC Open Society "NPO "Mars"", Ulyanovsk
[2] Institute of Aviation Technologies and Managements,
Ulyanovsk State Technical University

In clause authors represent algorithm of the automated designing of parameters of production-technological forms of formation thin bent structures in adapted under processes of the investigated enterprise on example UNIGRAphics; in detail paint it on elements analytical the schedule models with interpretation of the mathematical models realizing attributes САПР of parameters of technological process.
Key words: automated designing, algorithm, formation, structures, schedule models.

Ilya Popov, Graduate Student.
Irina Antipova, Dean at the Vocational Training Faculty.
E-mail: Iatung@rambler.ru.
Vyacheslav Mahitko, Candidate of Economics, Associate Professor at the Economy, Management and Computer Science Department
Maxim Savin, Senior Lecturer at the Aircraft Construction Department.