

УДК 621.981.1:629.73.002.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТОЛИСТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В МЕЖКЛЕТЬЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЧЕРЕЗ АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2011 П.М. Попов¹, С.Г. Рыжаков², М.В. Савин¹

¹ Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета
² УФКБ ОАО «Туполев», г. Ульяновск

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье авторы предлагают методы алгоритмизации технологических процессов производства тонких гнутолистовых профилей на основе совершенствования производственно-технологических процедур за счет введения в процесс подготовки их производства средств автоматизации проектирования и управления разработками с использованием САПР ТП, АСУТП и АСТПП.

Ключевые слова: технологические процессы, производство профилей, автоматизация проектирования.

Протяженность зоны плавного перехода связана с деформационными характеристиками подгибаемых полок и зависит как от геометрических параметров изготавливаемого профиля, режимов подгибки, так и от характеристик применяемого оборудования [4, 2, 1].

Для оптимизации процесса формообразования профиля необходимо разработать модель подгибки полки профиля в межклетьевом пространстве и сформулировать соответствующие требования к ведению процесса формообразования и межклетьевому расстоянию профилегибочного станка.

Рассмотрим общий случай технологии формообразования профиля на основе априорного алгоритмирования процессов формообразования с момента подгибки со стороны роликов текущего перехода, затем торцевого поджатия P_t и аксиального усилия (сжатия или растяжения) (рис. 1). При этом следует считать, что перегиб полки перед входом в роликовый калибр не оказывает существенного влияния на механические характеристики заготовки, то есть здесь пренебрегаем эффектом Баушингера.

Рассмотрим одну из основных процедур оптимизации технологического процесса формообразования профиля в межклетьевом пространстве, основанной на использовании методологии функционально – стоимостной инженерии по критерию функции с позиции функциональности на фрагменте алгоритма проектно – техно-

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

E-mail: pmporov2008@rambler.ru.

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

Савин Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Самолетостроение».

логической процедуры априорного моделирования технологии формообразования по блокам схемы алгоритма в последовательности проведения расчетов интенсивного деформирования в роликовых парах:

1. Принимаем, что показатели анизотропии μ_{ij} , где i – направление нормали к площадке, j – направление действия силы P_i удовлетворяют соотношениям [1], то есть:

$$\mu_{31} = \mu_{32} = 1 - \mu_{12} = \mu_{21}; \mu_{23} = \mu_{13} = 0.5, \quad (1)$$

если равенство обрабатывается в САПР-ТП (сходится), то осуществляется переход \rightarrow к 2.

2. Вычисляется полная энергия деформирования W , приходящаяся на единичную длину (складывается из следующих компонентов) [1], а именно:

$$W = W_{yz} + W_p + W_6 + W_a, \quad (2)$$

где W_{yz} – энергия деформирования уголкового участка; W_p – энергия разгибки заготовки в калибре при подсадке; W_6 – энергия деформирования полки из-за подъема на последующем переходе; W_a – энергия деформирования заготовки приложения аксиальных усилий. Если сумма вычислена и совпадает с расчетными данными, далее переход \rightarrow к 3.

3. Анализируется величина энергии деформирования уголкового участка на основе эмпирической формулы:

$$W_{yz} = \sigma_1 s_0^2 \alpha(x_3) / 4, \quad (3)$$

если равенство сходится с расчетами [2], осуществляется переход \rightarrow к 4, если не сходится, то переход \rightarrow к 12.

4. Проверяется энергия разгибки полки профиля, определяемая формулой [1]:

$$W_p = \sigma_1 s_0^2 \alpha(x_3) (1 - r_1^h / r_1), \quad (4)$$

где σ_1 – предел текучести материала в направлении x_p , МПа; s_0 – толщина исходной заготов-

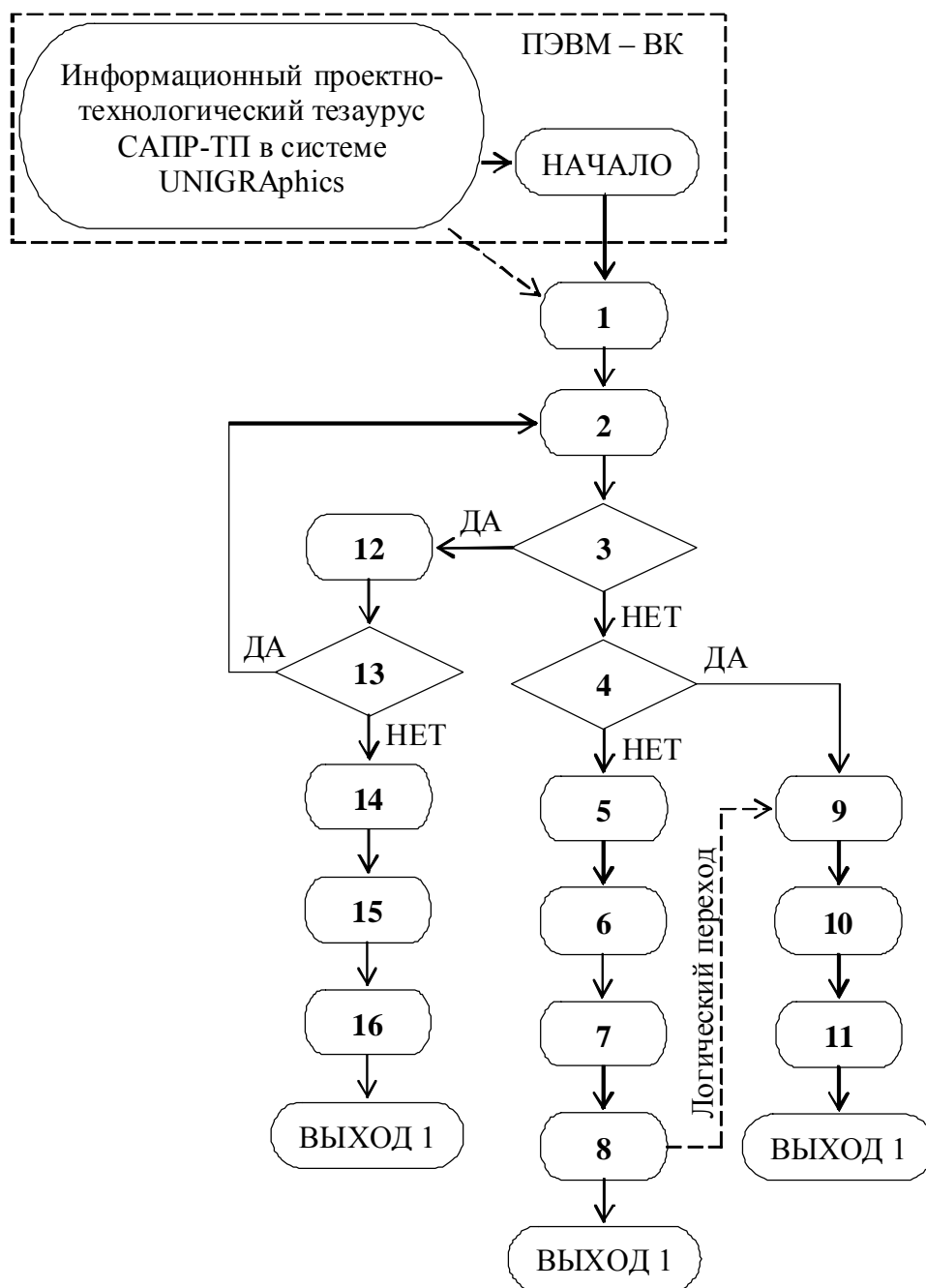


Рис. 1. Схема алгоритма проектно-технологической процедуры априорного моделирования технологии формообразования профиля в межклетьевом пространстве

ки, мм; $\alpha(x_3)$ – угол подгибки заготовки, град, r_1^h, r_1 – радиусы заготовки в зоне сгиба после осадки и при свободном формообразовании соответственно, мм (рис. 2).

Если соотношение (4) справедливо и согласуется с рисунком (2), то осуществляется переход \rightarrow к 5, если с рисунком (2) не согласуется, то осуществляется переход \rightarrow к 9.

5. Проводится обоснование формулы (4), где рассматривается уголкообразная зона на текущем переходе по рис. 2. И если верхний ролик перехода изготовлен при условии $AB = C_p$, то свободный участок заготовки длиной L_{AC} , не контактирующий с роли-

ком, определяем по эмпирической формуле вида:

$$L_{AC} = r_1 \alpha_1, \tag{5}$$

Если равенство справедливо и система его вычислила, то переход \rightarrow к 6.

6. Просматривается и рассчитывается развертка калибра. Если развертка калибра меньше развертки заготовки на величину Δh_p , при соблюдении условий сопряжения, то происходит осадка заготовки до радиуса r_1^h и, соответственно, определяется соотношение:

$$\Delta h_1 = L_{AC} - r_1^h * \alpha_1, \tag{6}$$

далее переход \rightarrow к 7.

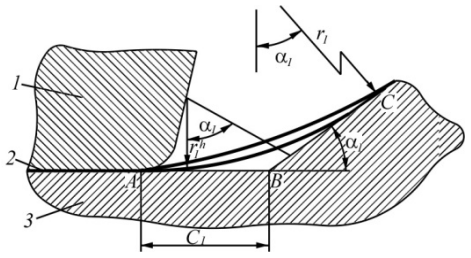


Рис. 2. Геометрические параметры процесса при свободной гибке и после осадки: 1 – верхний ролик; 2 – заготовка; 3 – нижний ролик

7. Производится расчет осадки заготовки, когда происходит увеличение ее кривизны в уголкового части и разгибание с радиусом кривизны r_1 длиной Δh_1 в соответствии с математической моделью (6). Определяется угол Θ^P , на который происходит разгибание кромок профиля, с учетом формул (5) и (6), а именно:

$$\Theta^P = \Delta h_1 / r_1 = \alpha (1 - r_1^h / r_1). \quad (7)$$

Вычисляется и соответствует предложению расчетов [1], осуществляется переход \rightarrow к 8.

8. Вычисляется комплексная математическая модель, составляемая из равенства (3), по значению Θ^P из формулы (7) при определении энергии разгибки (4), когда $\Delta h_1 > 0$, а радиус r_1 может быть виртуальным геометрическим параметром при $r_1^h = r_2$ при $\Delta h_1 = 0$. Меняются индексы модели для очередного перехода k по математической интерпритации:

$$W_p = \sigma_1 s_0^2 \alpha (x_3) (1 - r_k^h / r_{k-1}) / 4, \quad (8)$$

где r_k, r_{k-1} – соответственно радиусы кривизны заготовки на текущем и предшествующем переходах, мм. Если модель (8) согласуется с [1], то переход \rightarrow к “Выход” и, соответственно, логический переход \rightarrow к 9.

9. Анализируется работа формообразования полки профиля W_p , то есть, находим и анализируем деформацию вытяжки из геометрической поверхности изгиба полки профиля при подгибе ее на угол b в системе декартовых координат (к цилиндрическим):

$$x_1 = r \cos \alpha; \quad x_2 = r \sin \alpha; \quad x_3 = x_3, \quad (9)$$

где r – расстояние от линиигиба до заданной точки полки, мм. Одновременно в блоке 9 определяется приращение радиус-вектора или дифференциал дуги ds_0 по правилу дифференциальной геометрии с учетом (9):

$$ds_0 = \sqrt{(1 + r^2 (d\alpha / dx_3)^2)} dx_3. \quad (10)$$

Если равенство (9) и (10) логически согласованы и вычислен дифференциал ds_0 , то переходим \rightarrow к 10.

10. Используя разложение в ряд Тейлора правой части математической модели (10), вычисляем продольную деформацию полки ε_p , а именно, удерживаем два члена ряда, определяем деформацию:

$$\varepsilon_p = 0,5 r^2 (d\alpha / dx_3)^2 \quad (11)$$

и, соответственно энергию деформации полки вследствие поднятия кромки, приходящуюся на единичную длину, путем факторизации предела текучести и продольной деформации (11), интегрированием W_p , а именно:

$$W_p = 0,5 s_0 \sigma_2 (d\alpha / dx_3)^2 \int_0^b r^2 dr = \sigma_2 s_0 b^3 (d\alpha / dx_3)^2 / 6, \quad (12)$$

где σ_2 – предел текучести в направлении 3, МПа [3], после согласования данных с [4], переходим \rightarrow к 11.

11. Факторизация эквивалентного напряжения y_2 и продольной деформации (11) с учетом кинематических характеристик процесса и эффекта изменения ширины полки дает удельную энергию деформации W_a , что согласуется [3], рассчитываем как

$$W_a = \sigma_2 (R_k / R_{k-1} - 1) (r_k \alpha + b) s_0, \quad (13)$$

где R_k, R_{k-1} – радиус ролика на актуальном и предшествующем переходах, мм; b – ширина полки, мм. Также одновременно в блоке 11 проверяется суммарная энергия с учетом математических моделей (2), (3), (4), (12) и (13) вида:

$$W = \sigma_1 s_0^2 \alpha (x_3) (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + \sigma_2 s_0 b^3 (d\alpha / dx_3)^2 / 6 + \sigma_2 s_0 r_k \alpha (R_k / R_{k-1} - 1) + \sigma_2 s_0 b (R_k / R_{k-1} - 1) \quad (14)$$

Суммарная величина W соответствует расчетам [3], осуществляется переход \rightarrow к блоку “Выход”.

12. Вычисляется и анализируется величина ζ – минимальный функционал энергии, а именно:

$$\zeta = \int_0^L W dx_3, \quad (15)$$

где L – длина зоны плавного перехода, мм, а также по предложению [3] проверить

$$\sigma_1 = \sqrt{(\mu_{32} / \mu_{21})} \sigma_T;$$

$$\sigma_2 = \sqrt{(\mu_{13} / \mu_{31})} \sigma_T,$$

с учетом выражения (1), даем заключение на основе расчетов в блоке 12, что:

$$\sigma_1 = \sigma_T; \quad \sigma_2 = \sqrt{0,5 / (1 - \mu_{12})} \sigma_T; \quad (16)$$

тогда переходим \rightarrow к блоку 13.

13. Проверяется соотношение (16), поскольку здесь надлежит учесть использование (14) и (15) с целью минимизации функционала (15) при заданной длине L с неподвижными концами – на

первом этапе, а при $L=L_k$ – на втором этапе, находится из дополнительного условия через геометрические характеристики заготовки и технологической оснастки. Из условия $\delta\zeta = 0$, полученного уравнения Эйлера – Лагранжа, вычисляется:

$$\alpha(x_3) = \frac{A}{2B}x_3^2 + C_1x + C_2, \quad (17)$$

где C_1, C_2 – неопределенные константы. Тогда величины A и B вычисляются соотношениями:

$$A = \sigma_T s_0^2 (2 - r_k^h / r_{k-1}) / 4 + \sigma_T s_0 (R_k / R_{k-1} - 1) r_k \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} / 4;$$

$$B = \sigma_T s_0 b^3 \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} / 6.$$

Если все эти соотношения и, в том числе (17) – вычислены, то осуществляется переход \rightarrow к 14, где “ошибка” вычислений – устраняется.

14. Вычисляется (фильтруется) модель (17) исходя из предпосылок (допущение о сопряжении), что:

$$\alpha(0) = \alpha_o; \quad \alpha(L) = \alpha_o + \alpha_k, \quad (18)$$

где α_o – суммарный угол подгибки на предшествующем переходе, град; α_k – угол подгибки в текущем переходе, град, переход \rightarrow к 15.

15. Решается (17) после “фильтрации” в блоке 14 и с учетом (18) формируется математическая модель вида:

$$\alpha(x_3) = Ax_3^2 / (2B) + \alpha_k / L - AL / (2B) + \alpha_o, \quad (19)$$

Далее осуществляется переход \rightarrow к 16.

16. Определяется соотношение, связывающее $\alpha(x_3)$ с геометрическими характеристиками калибров и заготовки, с использованием дополнительного условия сопряжения $\alpha(x_3)|_{0,L} = \alpha_k$, и учетом модели (19), а также A и B :

$$L_k = \sqrt{\frac{8b^3\alpha_k}{3\left\{s_0(2 - r_k^h / r_{k-1}) / \sqrt{0.5 / (1 - \mu_{12})} + 4r_k(R_k / R_{k-1} - 1)\right\}}} \quad (20)$$

где k и $(k-1)$ – индексы текущего и предыдущего переходов соответственно. Если математическая модель (20) вычислена в системе UNIGRaphics без замечаний и нарушений вычислительного процесса, то осуществляется переход \rightarrow к “Выход”. Система заканчивает работу.

На основании разработки научно-обоснованного метода алгоритмизации процессов вычислений по методологии функционально – стоимостной инженерии, с использованием научных разработок авторов С.В. Филимонова и В.И. Филимонова [4], следует констатировать, что в математической модели (20) при стремлении толщины заготовки к нулю, протяженность зоны плавного перехода увеличивается. Для традиционного профилирования при равных радиусах формирующих роликов ($R_k = R_{k-1}$) и изотропного материала ($\mu_{12} = 0,5$) модель (20) приобретает вид извест-

ной формулы из [2] – Бхаттачария-Коллинза, что проверенно для сравнения с помощью программы MathCAD201Pro (рис. 3, 4, 5, 6).

Модель (20) следует использовать при разработке технологических процессов формообразования профилей из всех видов материалов (стальных, алюминиевых и др.). При проектировании же конфигураций роликовых калибров

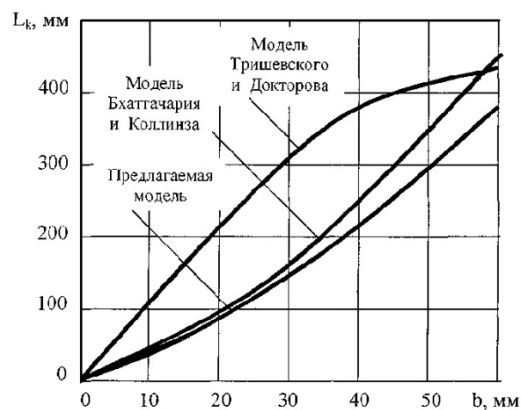


Рис. 3. Модели протяженности зоны плавного перехода по данным различных авторов

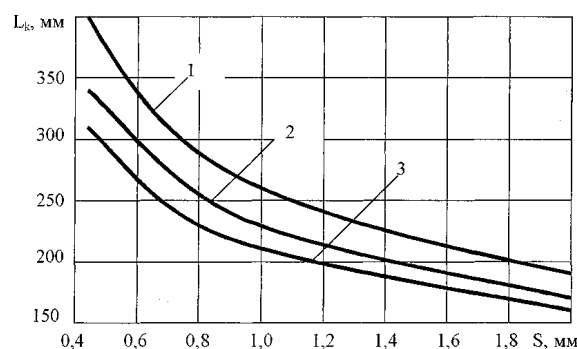


Рис. 4. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от толщины заготовки и радиусагиба:

1, 2, 3- $r=2s, 4s, 10s$ соответственно

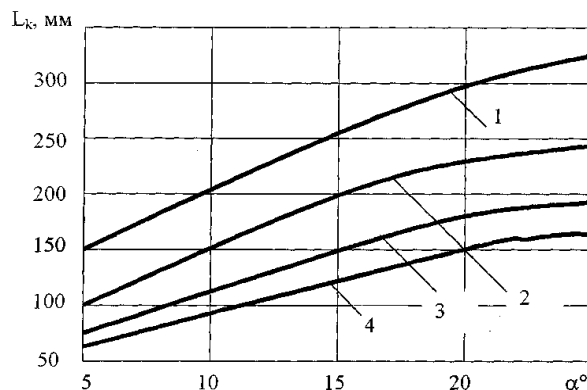


Рис. 5. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного уменьшения диаметров формирующих роликов: 1- $\chi = 0\%$; 2- $\chi = 1,1\%$; 3- $\chi = 2,2\%$; 4- $\chi = 3,3\%$

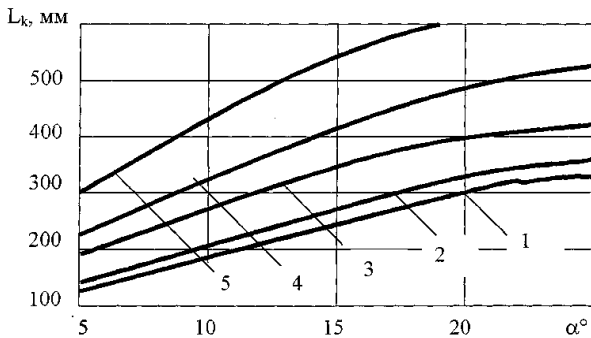


Рис. 6. Зависимость протяженности зоны плавного перехода от угла подгибки и относительного увеличения диаметров формирующих роликов:
 1- $\chi = 0\%$; 2- $\chi = 0,22\%$; 3- $\chi = 0,44\%$;
 4- $\chi = 0,66\%$; 5- $\chi = 0,88\%$

необходимо отслеживать выбор параметров, которые не приводили бы к превышению расчетной величины протяженности зоны плавного перехода величин межклетьевого расстояния. В частности, ограничение на угол подгибки в штатном технологическом переходе, в соответствии с формулой (20), можно смоделировать следующим выражением, сходным с выражением (20), а именно:

$$\alpha_k < 3L^2 \left\{ s_0 * (2 - r_k^h / r_{k-1}) / \sqrt{0,5(1 - \mu_{12})} + 4r_k * (R_k / R_{k-1} - 1) \right\} / (8b^3). \quad (20a)$$

При нарушении условия (20a) наблюдаются излишние энергетические затраты на переформовку, необоснованное деформационное упрочнение, приводящее к снижению ресурса пластичности, создание дополнительных остаточных напряжений, ухудшающих геометрию профиля при последующих термообработках, создание продольной кривизны или даже кромковой волнистости [1, 2, 3]. Модель (20a) идентично вычисляется в блоке 16 (типа фильтра Калмана).

Длину зоны плавного перехода с небольшим избытком (например, в 10%) следует использовать в качестве межклетьевого расстояния при проектировании оборудования. Следовательно, по результатам алгоритмизации можно утверждать, что метод интенсивного деформирования позволяет уменьшить межклетьевое расстояние и, как следствие, уменьшить габариты оборудования и его массу. Минимизация параметров оборудования весьма эффективна, особенно при разработке оборудования под строго ограниченную номенклатуру профилей. Таким образом, использование разработанной алгоритмической модели позволяет априори отметить сокращение затрат при изготовлении оборудования за счет экономии материалов, а также на стадии его эксплуатации вследствие уменьшения габаритов оборудования, а следовательно сокращение про-

изводственных площадей. На основании вышеизложенного рассмотрим последовательность разработки алгоритма определения критериев устойчивости плоской полки на основе математических моделей.

Определение критериев устойчивости тонколистовой полки под действием внутренних сил сжатия из-за деформаций растяжения, полученных в процессе профилирования на переходах предварительного формообразования заготовки в профиль рекомендуемых [1, 2, 3, 4 и др.], проведем машинным способом с разработкой оптимального алгоритма на основе математических моделей (рис. 7).

Рассмотрим работу алгоритма (рис. 7) в соответствии с правилами работы информационного тезауруса в базе системы, по входящим в него блокам:

1. Принимается

$$\omega = a \omega_1(x, y), \quad (21)$$

где a – бесконечно малый параметр, не зависящий от координат; ω_1 – конечная функция координат; после расчета и пополнения информационного тезауруса, переходим \rightarrow к 2.

2. Используя систему тригонометрических функций, задаем ω_1 в виде:

$$\omega_1 = \sin 2\pi x/T \cdot \sin \pi y/2b, \quad (22)$$

где T – длина периода волнистости, причем $T = 2b$, пластина разбивается на целое число квадратов переход \rightarrow к 3.

3. Вычисляется $V_1 = \iint W dx dy$, где W – потенциал моментов или работа срединной поверхности $V_2 = A_1$, а так же определяется A_2 – работа в плоскости XY по формуле:

$$A_2 = -s_0/2 \cdot \iint_S (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) dx dy. \quad (23)$$

Если $(V_1 + V_2) > (A_1 + A_2)$ переход \rightarrow к 4, а если $(V_1 + V_2) < (A_1 + A_2)$, то \rightarrow к 21.

4. Анализируется критическое значение внешних сил при $A_1 = V_2$, когда $V_1 - A_1 = 0$, то есть:

$$a^2 \iint_S [W + s_0/2 (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y)] ds = 0, \quad (24)$$

где $W = M_x \chi_x + M_y \chi_y$ – потенциал моментов; $\chi_x = \partial^2 \omega / \partial x^2$; $\chi_y = \partial^2 \omega / \partial y^2$ – кривизны, вызванные поперечным прогибом; $\varepsilon_x = (\partial \omega / \partial x)^2 / 2$; $\varepsilon_y = (\partial \omega / \partial y)^2 / 2$ – удлинения срединной плоскости. Если $A_1 = V_2$ и $V_1 - A_1 = 0$ – справедливо, то переход \rightarrow к 28, если нет, то переход \rightarrow к 5.

5. Вычисляем

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_y / 2 &= \sigma_i (\varepsilon_x - z \chi_x) / \varepsilon_i; \\ \sigma_y - \sigma_x / 2 &= \sigma_i (\varepsilon_y - z \chi_y) / \varepsilon_i. \end{aligned} \quad (25)$$

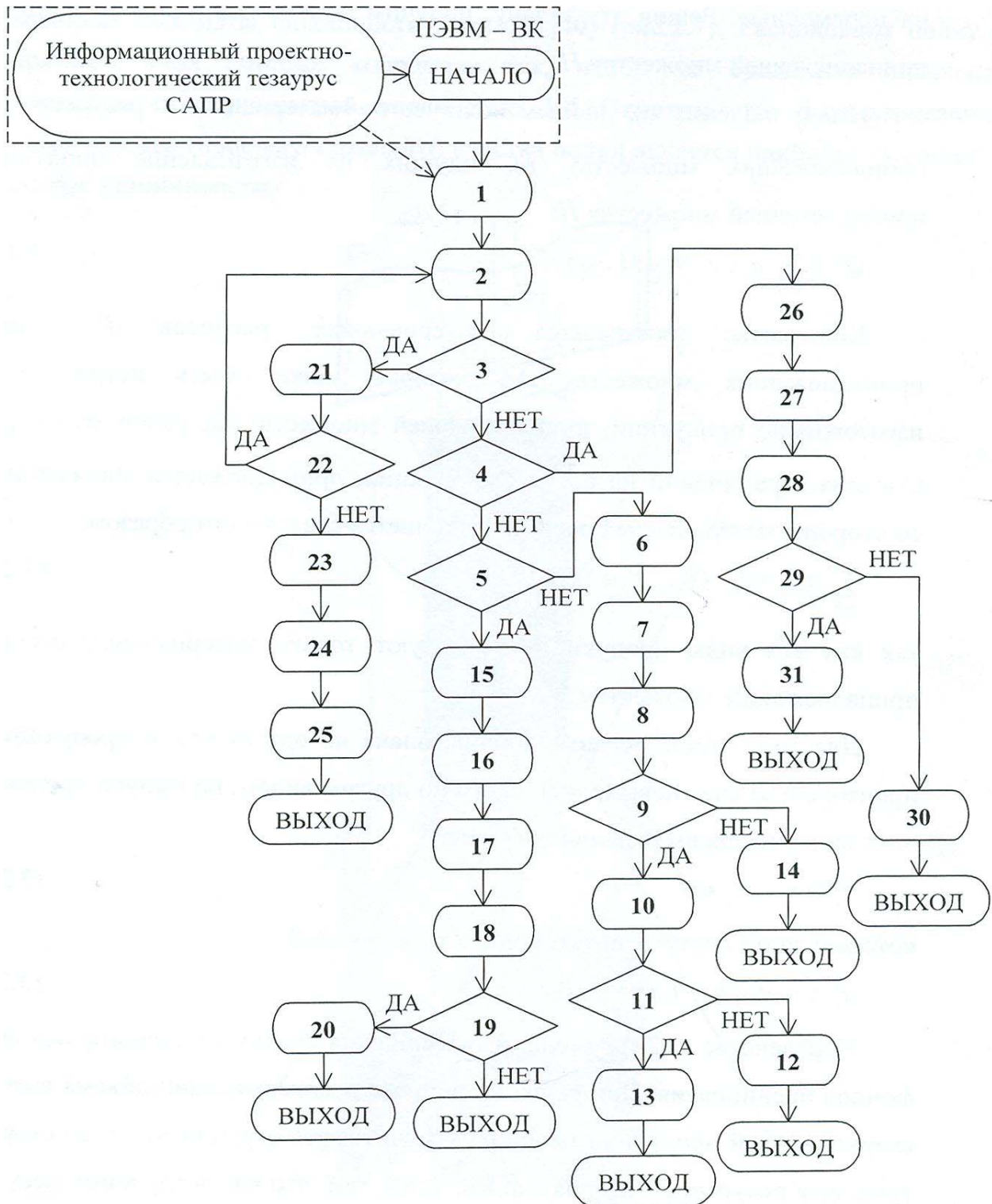


Рис. 7. Структурная блок-схема алгоритма для определения критериев устойчивости плоской полки на основе математических моделей и машинного моделирования

Анализируется их разность. Если эта разность *положительная*, то решаем:

$$\sigma_x = 2/3 \cdot \sigma_i [2(\varepsilon_x - z\chi_x) + (\varepsilon_y - z\chi_y)] / \varepsilon_i;$$

$$\sigma_y = 2/3 \sigma_i [2(\varepsilon_y - z\chi_y) + (\varepsilon_x - z\chi_x)] / \varepsilon_i.$$

и переходим → к 6, если отрицательная, то переходим → к 15.

6. Вычисляем изгибающие моменты:

$$M_x = \int_{-s/2}^{+s/2} \sigma_x z dz = -s_0^3 \sigma_i \cdot (2\chi_x + \chi_y) / 18 \varepsilon_i; \tag{26}$$

$$M_y = \int_{-s/2}^{+s/2} \sigma_y z dz = -s_0^3 \sigma_i \cdot (2\chi_y + \chi_x) / 18 \varepsilon_i.$$

Далее переход → к 7.

7. После проверки условия устойчивости (26), вычисляется

$$a^2 \iint_S \left\{ -\frac{s_0^3}{9} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\chi_x^2 + \chi_x \chi_y + \chi_y^2) + \frac{s_0}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) \right\} ds = 0.$$

Структурируется выражение вида:

$$a^2 \iint_S \left\{ -\frac{s_0^3}{9} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \left[E + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \mathfrak{Z}_1 + \mathcal{G} \right] + \left[\frac{s_0 \sigma_i}{2} \cdot \frac{1}{2} \mathfrak{Z}_2 + \frac{1}{4} \mathfrak{Z}_3 \right] \right\} ds = a^2 \Psi = 0 \quad (27)$$

по программе “МАХ” данного алгоритма, в результате чего уравнение (27) превращается в систему уравнений вида:

$$\begin{cases} E = \left(\frac{\pi}{b} \right)^4 \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} \\ \mathfrak{Z}_1 = \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} \\ \mathcal{G} = \left(\frac{\pi}{2b} \right)^4 \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} \\ \mathfrak{Z}_2 = \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} \\ \mathfrak{Z}_3 = \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \end{cases} \quad (27')$$

где E – постоянная составляющая пластической области; ν – постоянная угла подгибки; \mathfrak{Z}_i – постоянная смещения пластических волокон в углах подгибки. Выражения – математические модели (27) и их структурированные составляющие обрабатываются (вычисляются) инструментальным способом (на ПЭВМ), далее переход → к 8.

8. Вычисляется контур интегрируемой области посредством двукратного интеграла:

$$\Psi = \int_0^b dy \int_0^b dx \left\{ -\frac{s_0}{9\varepsilon_i} \left[\left(\frac{\pi}{b} \right)^4 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{2b} \right)^4 \right] \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi x}{b} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2b} + \frac{1}{8} \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \right\} dx = 0. \quad (28)$$

Далее переход → к 9.

9. Анализируем ширину полуволны потери устойчивости через линейную функцию:

$$b(y) = y. \quad (29)$$

далее, преобразовываем (28) и проверяем ее сходимость:

$$\Psi = \int_0^b dy \int_0^b dx \left(C_1 \sin^2 \frac{\pi x}{b} + C_2 \cos^2 \frac{\pi x}{b} \right) dx = 0, \quad (30)$$

где

$$C_1 = -\frac{s_0^2}{9\varepsilon_i} \sin^2 \frac{\pi y}{2b} \cdot \frac{21}{16} \left(\frac{\pi}{b} \right)^4 + \frac{1}{8} \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi y}{2b};$$

$$C_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi y}{2b}.$$

Тогда интегрируемый контур выражается как:

$$\Psi = \int_0^b dy \left\{ [(C_1 - C_2)/2 + C_2] \cdot x - \frac{b}{2(2\pi)} \sin \left(\frac{2\pi x}{b} \right) \cdot (C_1 - C_2) \right\} \Big|_0^b = 0.$$

Если интегрируемый контур благополучно определен, то переход → к 10, а если нет, то переход → к 14.

10. Через однократный интеграл вида:

$$\Psi = \int_0^b dy [(C_1 + C_2) \cdot b/2] = 0,$$

через функцию от y (30) и перегруппировкой по этой координате с учетом (29), вычисляем систему вида:

$$\begin{cases} \Psi = \int_0^b dy \left[D_1 \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2b} \right) \cdot \frac{1}{y^3} + D_2 \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2b} \right) \cdot \frac{1}{y} + D_3 \cdot \frac{1}{y} \right] = 0 \\ \text{где } D_1 = -\frac{21}{16} \cdot \frac{\pi^4 s_0^2}{18\varepsilon_i}; D_2 = -\frac{\pi^2}{64} + \frac{\pi^2}{8} = \frac{9\pi^2}{64}; D_3 = -\frac{\pi^2}{64}. \end{cases} \quad (31)$$

Вычисление обеспечивается инструментально, через программу “МАХ” ПЭВМ и тогда, переход > к 11.

11. Для интегрирования по y заменим $\sin^2 \frac{\pi y}{2b}$ многочленами первых степеней $\cos \frac{\pi y}{b}$, вычисляем:

$$\Psi = \int_0^b \left[\frac{D_1}{2} \cdot \frac{1}{y^3} - \frac{D_1}{2} \cos \left(\frac{\pi y}{b} \right) \cdot \frac{1}{y^3} + \frac{D_2}{2} \cdot \frac{1}{y} - \frac{D_2}{2} \cos \left(\frac{\pi y}{b} \right) \cdot \frac{1}{y} + D_3 \cdot \frac{1}{y} \right] dy = 0,$$

сводя интеграл к конечной форме:

$$\Psi = \left[-\frac{D_1}{2} \cdot \frac{1}{y^2} + \frac{D_1}{2} \cos \left(\frac{\pi y}{b} \right) \cdot \frac{1}{2y^2} - \frac{D_1}{2} \frac{\pi}{b} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2b} \right) \cdot \frac{1}{y} + \frac{D_1}{2} \cdot \frac{2\pi^2}{b^2} C_i \left(\frac{\pi y}{b} \right) + \frac{D_2}{2} \ln y - \frac{D_2}{2} C_i \left(\frac{\pi y}{b} \right) + D_3 \ln y \right] \Big|_0^b = 0, \quad (32)$$

где $C_i(\pi y/b) = \int \cos(\pi y/b) \cdot 1/y dy$ – интегрированный косинус. Здесь, если интеграл вычислен без ошибок (погрешностей), то переход \rightarrow к 12, если есть погрешности, то переход \rightarrow к 13.

12. Используя конечную величину $\Psi = -D_1\pi/b^2 + (D_2/2 + D_3)\ln b = 0$, с получением условия устойчивости, определяем очаг деформации и интенсивность деформации:

$$1.33 * \pi^3 * s_0^2 * (\varepsilon_i * b^2)^{-1} + \ln b = 0, \quad (33)$$

где ε_i заменяется на среднее интегральное значение функции распределения продольных остаточных деформаций, то есть:

$$\varepsilon_i = b^{-1} * \int_0^b \varepsilon_{ост}(\rho) d\rho. \quad (34)$$

Расчет завершен положительным заключением, что неизбежна потеря устойчивости плоской полки в виде гофрообразования, переход \rightarrow “Выход”.

Блоки алгоритма (рис. 7) с 13 по 31 предназначены для решения задач *оптимизации параметров для оценки амплитуды кромочной волнистости при формообразовании тонкостенных профилей*. Алгоритм апробирован в системе UNIGRaphics. Сначала были разработаны математические модели с (21) по (34), а затем с помощью программы “MAX” в системе UNIGRaphics (ПЭВМ) решены математические модели с (35) по (54), то есть 19 блоков решают 19 моделей.

С научно-технической точки зрения, для наглядности, ниже приводятся все 19 моделей, а алгоритм далее не описывается, так как основные формулы – математические модели с (21) по (34), решенные с помощью ПЭВМ, дают основание полагать, что для системы UNIGRaphics, решение остальных моделей с (35) по (54) не составляет трудностей.

На основании вышеизложенного, приведенного алгоритма, его оптимизации и апробирования в системе UNIGRaphics, следует, что *инструментальный метод* (неиспользование ПЭВМ) для расчета основных критериев устойчивости плоской полки на основе математических моделей является *эффективным*, что позволяет привести к разработке моделей оптимизации параметров для оценки амплитуды кромочной волнистости при формообразовании тонкостенных профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Ю.Л.* Современные технологии сборки планера самолёта. М.: Машиностроение. 2007. С. 225.
2. *Арьшевский Ю.М., Цветков А.В., Матвеев А.Ю.* // Сборник научно-технических статей. Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях самолетостроения. НИАТ. 2002. С. 26-30.
3. *Ренне И.П.* Пластический изгиб листовой заготовки // Научно-технический сборник Тульского механического университета. 2000. Вып. 4. С. 146-162.
4. *Давыдов В.И., Максаков М.П.* Производство гнутых тонкостенных профилей. М.: Металлургиздат. 2002. 240 с.

PERFECTION OF METHODS OF THE ORGANIZATION OF MANUFACTURE BENT OF STRUCTURES IN BETWEEN CELLS SPACE THROUGH ALGORITHMS OF DESIGNING

© 2011 P.M. Popov¹, S.G. Ryzhakov², M.V. Savin¹

¹ Institute of Aviation Technologies and Management,
Ulyanovsk State Technical University

² Open Society “Tupolev”, Ulyanovsk Design Bureau

In clause authors offer methods of algorithmization of technological processes of manufacture thin bent structures on the basis of perfection of industrial-technological procedures due to introduction in process of preparation of their manufacture of means of automation of designing and management of development with use SAPR TP, ASUTP and ASTPP.

Key words: technological processes, manufacture thin bent structures, automation of designing.

Petr Popov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Construction Department. E-mail: pmpopov2008@rambler.ru.
Stanislav Ryzhakov, Candidate of Technics, Deputy Chief Designer, Director. E-mail: ufkbtu@mv.ru.
Maxim Savin, Senior Lecturer at the Aircraft Construction Department.