

**НАПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

© 2018 Е.В. Маркова, А.М.Ф. Аль-Дарабсе, И.Г. Нуретдинов

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

В статье авторами рассматриваются направления интенсификации процесса изготовления тонкостенных профилей методом стесненного изгиба на основе деформирования листового материала на волочильно-прокатных установках типа ВПУ-120/5,5; ВПУ-120/7,5 и др. Формируются направления интенсификации формоизменяющих гибочных операций; рассматривается процесс интенсификации за счёт проведения оптимальных режимов термомеханической обработки в зависимости от механических свойств формуемого материала; устанавливаются математические зависимости процесса волочения тонкостенных профилей в роликовом формирующем инструменте при создании аксиального сжатия по зонам сгиба; рекомендуются схемы и способы формообразования с предоставлением графоаналитических моделей.

Ключевые слова: тонкостенные профили, качество, летательные аппараты.

Ужесточение требований ко всем критериям работоспособности подкрепляющего набора панельных конструкций летательных аппаратов (ЛА) при повышении их ресурса и снижении массы конструкций привели к необходимости применения более высокопрочных и менее технологичных низкопластичных материалов, замене пресованных профилей гнутолистовыми. Для повышения технологичности и качества тонкостенных профилей из листовых заготовок наиболее целесообразно использовать процессы волочения и сочетания волочения с прокаткой, используя метод стесненного изгиба (СИ) и пути его интенсификации [1].

Стесненный изгиб, создающий в зоне сгиба условия деформирования близкие к объемному сжато-напряженному состоянию материала, сам по себе является средством интенсификации процесса гибки, как одного из наиболее распространенных из формоизменяющих операций. Получение за 3-4 перехода профилей весьма сложной формы сечения при 12-18 зонах сгиба вместо 10-14 переходов при традиционных методах гибки, делает стесненный изгиб экономически целесообразным даже при мелкосерийном производстве летательных аппаратов (рис. 1).

Для осуществления гибки в условиях сжато-напряженного состояния (СИ) потребовалась

Маркова Елена Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика, управление информатика». E-mail: morozova319@yandex.ru

Амер Мохаммад Фархан Аль-Дарабсе, студент группы АСВдс-41 кафедры «Самолето- и вертолетостроение». E-mail: amersatarah4@gmail.com

Нуретдинов Ильдар Габбасович, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Экономика, управление и информатика». E-mail: nur.il.gab@yandex.ru

разработка и специального оборудования, и специальных средств технологического оснащения процесса [2]. Созданные гибочно-прокатные станки моделей от ГПС-200 до ГПС-300М6, волочильно-прокатные установки ВПУ-120/5,5, ВПУ-120/7,5 и разработанные в их развитие устройства для изготовления профилей посвоим конструктивным особенностям и принципу работы дополнительно интенсифицируют гибочные операции. Перечисленное оборудование позволяет изготавливать угловые, швеллерные зетовые и корытообразные профили широкой номенклатуры с глубиной формовки от 8 до 50 мм, даже 75 мм, при использовании различных листовых материалов толщиной от 0,5 до 2,5 мм и схем формообразования в 3-5 переходов (рис. 2).

Интенсификацией уже стесненного изгиба являются гибки-волочения и сочетания волочения с прокаткой, при которых возможно улучшить микроструктуру поверхностного слоя и повысить точностные возможности, практически исключив пружинение за счет создания расчетных внутренних силовых факторов в зонах наибольших пластических деформаций. Это позволяет исключить доводочные работы, что непременно сопутствует гибке традиционными методами.

В установках, например, ВПУ-120/7,5 и гибочно-прокатном комплексе на базе волочильного стана ЦС-28 одновременно с профилированием листовой заготовки ведется правка изготавливаемого профиля растяжением за счет приложения в очаге наибольших пластических деформаций усилия волочения-растяжения. Этим исключается применение специализированного оборудования для правки растяжением типа ПГР-7, ПГР-8 или УППР-1.

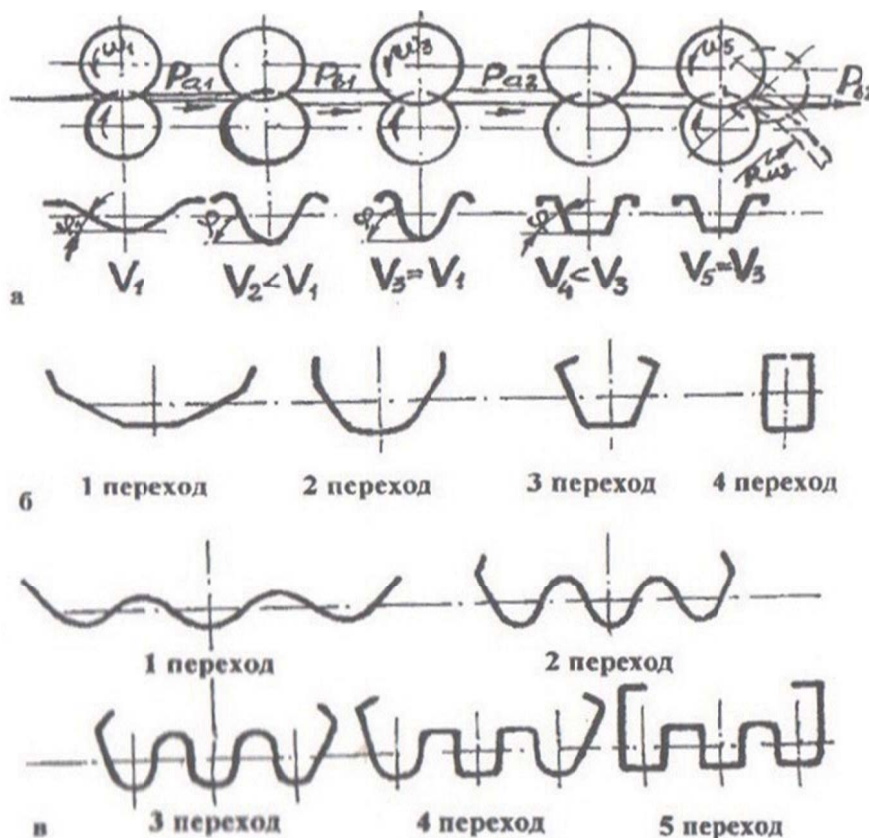


Рис. 1. Интенсификация процессов стесненного изгиба:
 а – сочетание процессов волочения и прокатки. Усилия подпора P_{a1} P_{a2} ,
 усилия аксиального растяжения P_{a1} P_{a2} при изготовлении профилей с продольной кривизной;
 б – изготовление профиля замкнутой формы сечения;
 в – изготовление профиля с 12-18 зонами сгиба

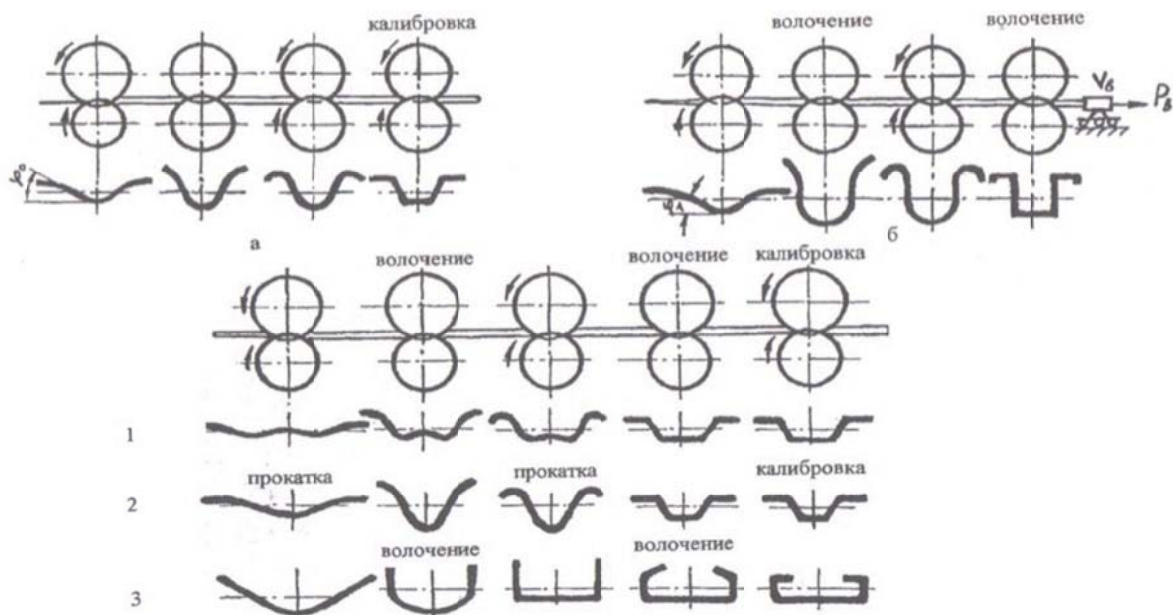


Рис. 2. Схемы и способы формообразования профилей из низкопластичных материалов при волочении в сочетании с прокаткой при холодной деформации стеснённым изгибом:
 а, б – наиболее целесообразные варианты

Интенсификации формоизменяющих гибочных операций при изготовлении профилей из листовых заготовок служит создание в процессе профилирования осевого подпора в зоне наибольших пластических деформаций, что

создает не только тангенциальные и радиальные сжимающие напряжения, но и аксиальные, благодаря чему становится возможным увеличение степени деформаций на каждом переходе и сокращение их числа до трех-пяти, то есть в

2-3 раза по сравнению с традиционными методами гибки.

На созданном гибочно-прокатном оборудовании за счет интенсификации методов формообразования освоена технология свертывания листовой заготовки, как особого процесса гибки, из сталей и алюминиевых сплавов толщиной 0,8...1,5 мм для последующего изготовления сварных труб диаметром от 15 до 80 мм.

Сочетание методов стесненного изгиба и традиционного профилирования листовых заготовок – новый освоенный в процессе исследований путь интенсификации стесненного при изготовлении гнутых профилей сложной формы поперечного сечения с 12-18 зонами сгиба (см. рис. 1).

Интенсификацией процессов стесненного изгиба является проведение оптимальных режимов термомеханической обработки (ТМО), которая в зависимости от механических свойств материала может быть низкотемпературной (НТМО). Так, что за счет НТМО при изготовлении профилей из алюминиево-литиевых сплавов удалось повысить механические свойства ($S\sigma', S\sigma, 2'$) на 150-200 МПа, почти не снижая относительное удлинение $d, \%$ и даже повышая его.

Необходимо установить математические зависимости параметров процесса волочения тонкостенных профилей в роликовом формирующем инструменте с созданием аксиального сжатия за счёт различных окружных скоростей на предварительном и окончательном переходах [2]. При этом возможно исключить потерю устойчивости заготовки, что характерно для процессов прокатки длинномерных тонкостенных профилей за счёт согласования величины допустимого аксиального сжатия P_{ax} и величины зазора h (S_k) в последующей роликовой паре.

Рассмотрим механизм взаимодействия Радвухстороннего сжатия профиля роликами на переходе предварительного формообразования (рис. 3).

Для выделенного элемента профиля dx условие равновесия имеет вид:

$$Sd\sigma_x + \sigma_x ds + 2pdX(\operatorname{tga} + f) = 0, \quad (1)$$

где s – толщина элемента;

σ_x – напряжение в направлении координаты X ;

p – нормальное давление со стороны роликов;

a – угол наклона зоны контакта с роликом к продольной оси;

f – коэффициент трения скольжения.

С учетом условия пластичности (1) получаем дифференциальное уравнение для вычисления p

$$\frac{dp \left(1 - \frac{s_0 - s_k}{4R}\right)}{\sigma_s + p \left(\frac{s_0 - s_k}{4R}\right) + pf \cdot \sqrt{\frac{2R}{s_0 - s_k}}} = \frac{dX}{\sqrt{\frac{2s_0^2}{s_0 - s_k} + X}}, \quad (2)$$

где s_0 – толщина исходной заготовки;

s_k – величина зазора в роликах;

σ_s – предел текучести материала.

Приведенное значение радиуса R , вычисляется по формуле:

$$R = \frac{2R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2},$$

где R_1 и R_2 – радиусы верхнего и нижнего роликов соответственно.

Интегрирование уравнения (2) дает:

$$\left[\sigma_s + pf \sqrt{\frac{2R}{s_0 - s_k}}\right] \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2R}{s_0 - s_k}} = C \left(X + \sqrt{\frac{2R \cdot s_0^2}{s_0 - s_k}}\right), \quad (3)$$

где C – постоянная интегрирования.

Граничные условия для входного сечения – нулевые, а для выходного должно выполняться соотношение $\sigma_x + \sigma_a = 0$. Принимая граничные условия, из формулы (3) получаем нормальное давление P_1 на входе в ролики:

$$(\sigma_s + p_1 f \lambda)^{f\lambda} = \frac{\lambda^2}{R\sqrt{2} + \lambda^2} \left[\sigma_s \left(1 + \frac{f\lambda}{1 - \frac{f\lambda}{2\lambda^2}}\right)\right]^{f\lambda} (x + s_0 \lambda), \quad (4)$$

$$\text{Здесь } \lambda = \sqrt{\frac{2R}{s_0 - s_k}}.$$

Для выходной зоны знак коэффициента трения скольжения, меняется на противоположный и определив постоянную интегрирования из граничного условия [4], получаем распределение нормального давления P_2 в выходной зоне:

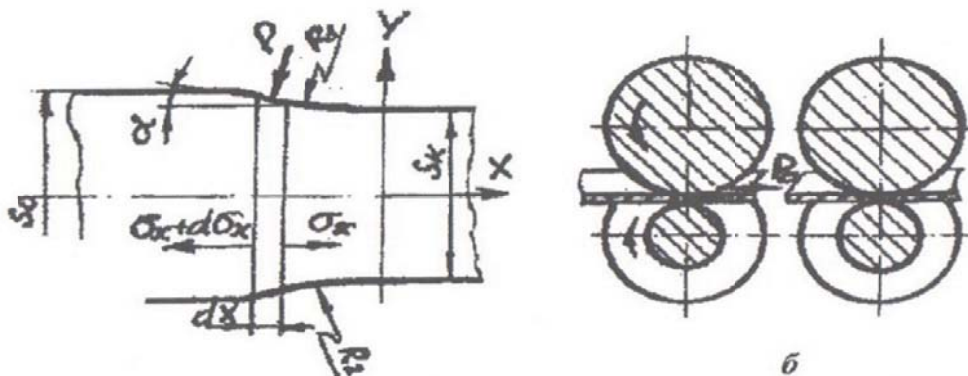


Рис. 3. Схема взаимодействия инструмента и заготовки при создании аксиального сжатия:

а – силовые факторы при обжатии заготовки по толщине;

б – создание аксиального сжатия при волочении

$$(\sigma_s - P_2 f \lambda)^{-f \lambda} = \left(\sigma_s - \frac{\sigma_s + \sigma_a}{1 - \frac{1}{2\lambda^2}} \right)^{-f \lambda} \left(\frac{x + s_0 \lambda}{s_0 \lambda} \right), \quad (5)$$

где C – постоянная интегрирования.

Суммарное нормальное усилие P_n , действующее на заготовку, определится:

$$P_n = B_3 \int_0^{x_1} P_2(x) dx + B_3 \int_{x_1}^{x_2} p_1(x) dx, \quad (6)$$

где B_3 – ширина заготовки;

x_B – протяженность зоны контакта заготовки и роликов, равная $R \sqrt{2/\lambda}$;

x_H – координата нейтрального сечения, определяемая из условия согласования значений $p_1(x)$ и $P_2(x)$ для входной и выходной зон соответственно.

При наличии аксиального сжатия в условиях, близких к созданного в роликах проскальзывания, нейтральное сечение смещается в сторону входного сечения и тогда $x_B \approx x_H$.

В таком случае после проведения интегрирования нормальное усилие P_n в выражении (6) получит вид:

$$P_n = \frac{B_3}{f \lambda} \left\{ \sigma_s x_B - \left(\sigma_s - \frac{\sigma_s + \sigma_a}{1 - \frac{1}{2\lambda^2}} \right) \frac{s_0 \lambda}{f \lambda + 1} \left[\left(\frac{x_B}{s_0 \lambda} + 1 \right)^{f \lambda + 1} - 1 \right] \right\}. \quad (7)$$

С учетом $x_B/R = \sqrt{2/\lambda} \leq 0,03$, с точностью, достаточной для принятого рассмотрения, можно определить аксиальное усилие P'_a :

$$P'_a = 2f \cdot P_n. \quad (8)$$

Тогда интегральное условие проскальзывания примет вид:

$$P'_a = \sigma'_a \cdot s_0 \cdot P_3. \quad (9)$$

Из формулы (9), с учетом (7) и (8) получим уравнение, позволяющее определить величину необходимого зазора в паре роликов предварительного формообразования, чтобы создать потребное аксиальное усилие при условии $\lambda^2 \gg 1,0$

$$\frac{\sigma_s R \sqrt{2}}{\lambda} + \frac{\sigma'_a s_0 \lambda}{f \lambda + 1} \left[\left(\frac{R \sqrt{2}}{\lambda^2 s_0} - 1 \right)^{f \lambda + 1} - 1 \right] = \frac{\sigma'_a s_0 \lambda}{2}. \quad (10)$$

Следует заметить, что при $s_0 > s_k$ (прокатка) связь величины зазора в роликах с величиной P_a не зависит от B_3 и формы сечения заготовки.

Но в случаях, когда $s_k > s_0$ (волочение) и когда рассматривается разложение сил в сечении с координатой, близкой к x_B оба указанных фактора играют существенную роль. При этом надлежит рассмотреть задачу о действующих на заготовку со стороны роликов радиальных нагрузках [5].

Используя известные уравнения (8), описывающие поведение осесимметричных оболочек, получим выражение для нормального давления на заготовку со стороны роликов (рис. 4)

$$P_i = - \left\{ \frac{1}{\gamma_i} - \left[\frac{1 + \gamma_i}{\gamma_i} \right] \left(\frac{\rho_i}{\rho_i + s_0} \right) \gamma_i \right\} \frac{s_0 \cos \beta_i}{\rho_i} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s, \quad (11)$$

где P_i – нормальное давление на i -ом участке заготовки (i принимает значения, равные 1 и 2);

β_i – угол наклона обжатой зоны по отношению к продольной оси;

ρ_i – радиус кривизны заготовки в трансверсальном сечении на i -ом участке заготовки.

Здесь $\gamma_i = f / \operatorname{tg} \beta_i = f \cdot \sqrt{\frac{2\rho_i}{s_0}}$.

Суммарное усилие P_{ni} , действующее на единицу длины заготовки, определится:

$$P_{ni} = \int_{\rho_i}^{\rho_i + s_0} P_i \frac{d\tau}{\sin \beta_i}, \quad (12)$$

где τ – переменная интегрирования.

Из выражений (11) и (12) после интегрирования с точностью до одного процента имеем:

$$P_{ni} = s_0 \operatorname{ctg} \beta_i \left\{ \ln \frac{\rho_i + s_0}{\rho_i} - \frac{(1 + \gamma_i) s_0^2}{\rho_i^2} \right\} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s. \quad (13)$$

Аксиальное усилие определится следующим:

$$P'_a = (P_{n1} \rho_1 + 2P_{n2} \rho_2) f \pi. \quad (14)$$

При выборе схемы формообразования следует учитывать связь ρ_1 и ρ_2 (см. рис. 4) через ширину заготовки [4]

$$\rho_1 + 2\rho_2 = B_3 / \pi,$$

На основании (14), используя аналог выражения (9), $P'_a = \sigma'_a \cdot s_0 \cdot B_3$, получим для случая $s_0 < s_k$ условие проскальзывания:

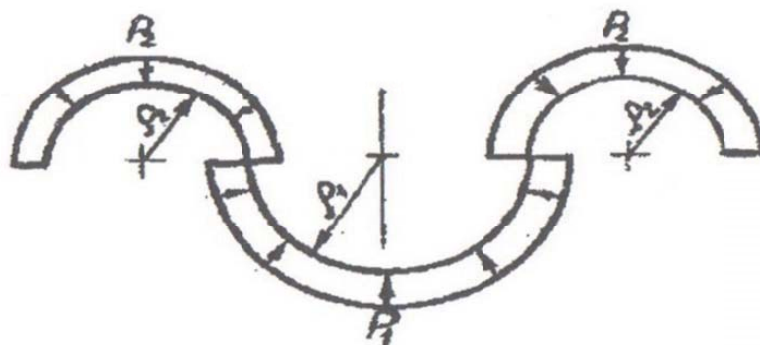


Рис. 4. Схема обжатия заготовки на предварительном переходе при изготовлении корытообразного профиля

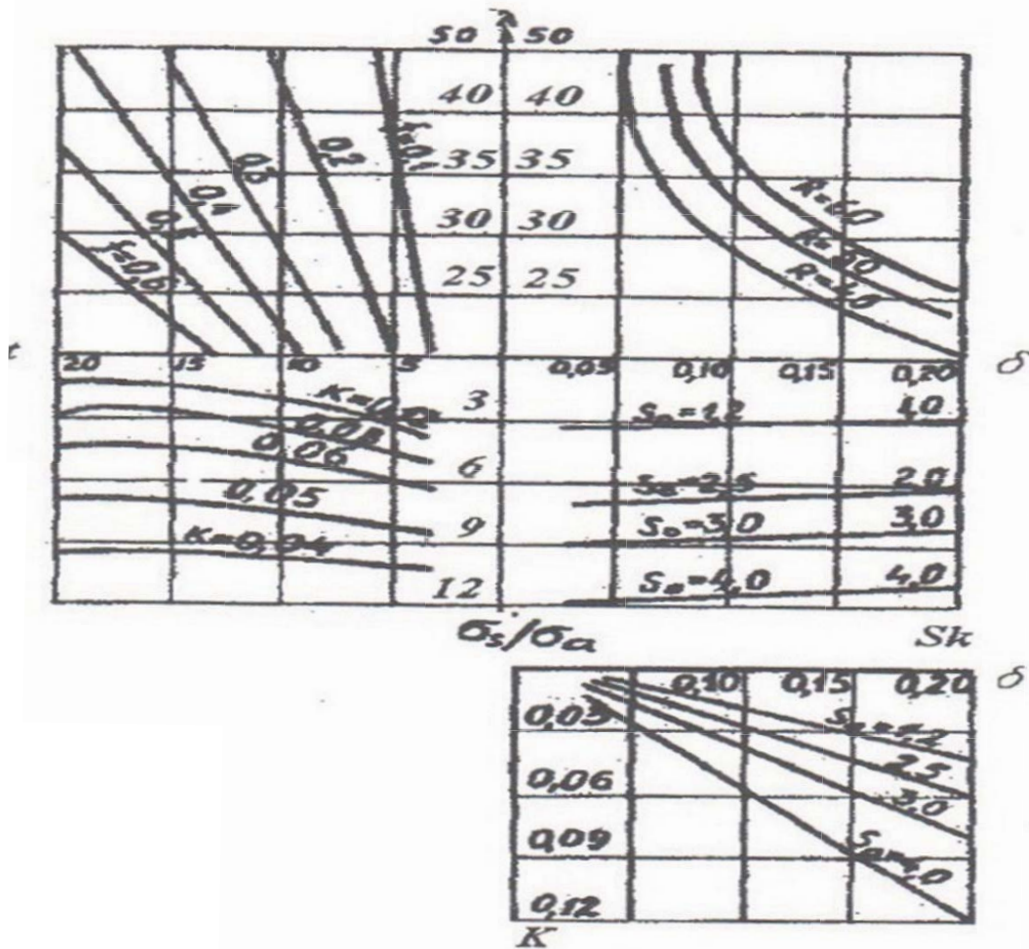


Рис. 5. Номограмма для определения настроечных параметров процесса гибки-волочения

$$P_1^{3/2} \ln \frac{\rho_1 + s_0}{\rho_1} + 2\rho_2^{3/2} \ln \frac{\rho_2 + s_0}{\rho_2} - (1 + \gamma_i) s_0^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_1}} + \frac{2}{\sqrt{\rho_2}} \right) = \frac{E_c}{f\pi} \sqrt{\frac{3s_0}{8}} \frac{\sigma_a}{\sigma_s} \quad (15)$$

Таким образом, из уравнения (15) видно, что условия проскальзывания зависят от схемы формообразования и ширины исходной заготовки.

Полученные уравнения (10) и (15) полностью определяют условия проскальзывания при S_k , незначительно отличающихся от S_0 в меньшую или в большую сторону. В случае $S_k > S_0$ используем формулу (15), а при $S_k < S_0$ формулу (10). Кроме того, формула (15) дает нижнюю границу аксиального давления σ_a , определяемого выражением (10), из которого следует: если $S_k = S_0$, то проскальзывание наступает при $\sigma_a = 0$, хотя в действительности оно имеет место при σ_a (15).

Исходя из формулы (10) построена номограмма (рис. 5), позволяющая определить величину аксиального сжатия в зависимости от величины зазора в роликах.

Для построения использованы новые переменные:

$$t = f \cdot \lambda + 1; \delta = s_0 - s_k; k = \frac{R\sqrt{2}}{s_0 \lambda} = \frac{\delta}{s_0 \sqrt{2}}$$

Значит, требуемое аксиальное сжатие можно

обеспечить путем выбора схемы формообразования при данной ширине заготовки, или регулированием зазора в роликах.

Причем, при выборе схемы формообразования потребуется учитывать ряд конкурирующих факторов: получение благоприятного напряженно-реформированного состояния в роликах окончательного формообразования, создание условий для обеспечения требуемого усилия сжатия, выдерживание больших аксиальных усилий без потери продольной устойчивости деформируемой заготовки и т.п. Решить такую задачу невозможно без рассмотрения вопроса оптимизации схемы формообразования [6].

Полученные аналитические зависимости создания аксиального сжатия с учетом схемы формообразования и величины зазора в роликовом инструменте, дают возможность определить настроечные параметры оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Дарабсе А.М.Ф., Маркова Е.В. Автоматизированный метод обучения студентов инженерных специальностей. // В сборнике: Технологическое развитие

- современной науки: тенденции, проблемы и перспективы. Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 2018. - С. 4-6.
2. Колганов И.М., Тюнькин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки методом конечных элементов при формировании гнутолистового профиля стесненным изгибом // Авиационная промышленность. 2004. № 1. - С. 34-37.
 3. Маркова Е.В., Морозов В.В. Методика оценки уровня конкурентоспособности продукции инновационного предпринимательства // Вестник Самарского муниципального института управления, 2013. №1 (24).- С. 47-54.
 4. Морозова Е.В. Моделирование деятельности инновационного образовательного комплекса. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 2(2). С. 306-310.
 5. Морозова Е.В., Похвоицев А.А. Организация инновационных образовательных комплексов: сущность и принципы. // Человек и труд, 2009. № 4.- С. 45.
 6. Морозова Е., Поварич И. Социальная защита в сфере труда // Человек и труд, 2005. № 8. - С. 20

DIRECTIONS OF INTENSIFICATION OF PROCESS OF MANUFACTURING OF SLENDER SECTIONS AND IMPROVEMENT OF THE QUALITY FLIGHT VEHICLES

© 2018 E.V. Markova, A.M.F. Al-Darabseh, I.G. Nuretdinov

The Institute of Aviation Technology and Management
The Ulyanovsk State Technical University

In the article, the authors consider the directions of intensification of the process of manufacturing thin-walled profiles by the method of constrained bending based on the deformation of the sheet material on wire-rolling installations of the type VPU-120 / 5.5; VPU-120 / 7.5 and others. Forms directions of intensification of form-changing bending operations; the process of intensification is considered due to the optimal modes of thermo mechanical processing, depending on the mechanical properties of the material being molded; the mathematical dependences of the process of drawing thin-walled profiles in a roller forming tool are established when creating axial compression along the bend zones; Recommended schemes and methods of shaping with the provision of grapho-analytical models.

Keywords: thin-walled profiles, quality, aircraft.

Elena Markova, Ph.D., Associate Professor of the Department of «Economics, Management and Informatics».

E-mail: morozova319@yandex.ru

Amer Mohammad Farhan Al Darabseh, a Student of ASVDS-4 of the Department «Aircraft and Helicopter Construction». E-mail: amersamarah4@gmail.com

Ilda Nuretdinov, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of «Economics, Management and Informatics».

E-mail: nur.il.gab@yandex.ru