

УДК 621.015

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ АГРЕГАТНО-СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2015 С.Ф. Тлустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

Изложены результаты теоретических исследований и методика многопереходной деформации по основным видам технологических процессов формообразования профилей сложного сечения. Проведено теоретическое обоснование способов выбора материала заготовок по необходимым физико-механическим свойствам исходных заготовок из различных сплавов и условиям термической обработки для соответствующих процессов обработки металлов давлением. Проведен анализ возможностей получения деталей различными видами холодной деформации применительно к формообразованию профилей различной конфигурации и назначения. Приведены необходимые теоретические обоснования расчётных схем деформаций, показана методика выбора рекомендаций по устранению возможных дефектов изделий, корректировки технологических процессов и повышения качества изделий. Проведено исследование режимов технологических процессов формообразования на базе современного прикладного программного обеспечения с целью автоматизации технологической подготовки производства.

**Ключевые слова:** степень деформации по переходам, прокатный стан, упруго-пластическая деформация, анизотропия, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений и деформаций, константы механических свойств, остаточные напряжения.

В общем комплексе технологии изготовления профилей различной формы сечения и длины из листового материала все возрастающее значение приобретают процессы формообразования листовых заготовок из конструкционных сталей за ряд последовательных переходов на специализированном оборудовании и оснастке. Это позволяет наиболее эффективно автоматизировать такие процессы на базе прокатных станов с числовым программным управлением. Для этого необходимо совершенствовать методику проектирования технологических процессов деформации для новых материалов, применяемых в конструкциях летательных аппаратов, связанную с выбором вида и материала заготовок, видов термообработки, распределения степеней деформации по переходам, применяемых смазывающе-охлаждающих жидкостей и др. Также необходимо корректировать методику анализа и оценки существующих альтернативных способов деформации заготовок по переходам, например, в роликах прокатных станов по клетям в стесненных условиях деформации или в штампах по переходам, когда металл пластически деформируется в холодном состоянии. Также необходимо обеспечить возможность механизации и автоматизации технологических процессов путем создания комплексов оборудования, обеспечивающего выполнение всех операций производственного

процесса в автоматическом режиме, с возможностью получения взаимозаменяемых деталей с высокой степенью точности размеров, обладающих достаточной прочностью и жесткостью и высокими показателями ресурса изделий.

Исследование процессов деформации металла для деталей сложной конфигурации будем вести в предположении, что на отдельных участках заготовки происходит гибка и вытяжка. Рассмотрим случай вытяжки, когда наблюдаются большие усилия и деформации заготовки (рис. 1), где участок  $ab$  характеризуется растягивающими усилиями, участок  $bc$  – участок радиусного закругления, на котором возможно утонение заготовки, участок  $cd$  – участок с прямолинейными образующими.

Для оценки возможности применения теории вытяжки к технологическим процессам формообразования профилей необходимо разработать методику вычисления таких основных параметров вытяжки как усилие процесса, геометриче-

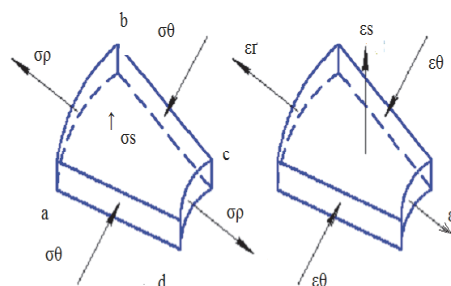


Рис. 1. Схема вытяжки при больших усилиях и деформациях заготовки

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

ские параметры оснастки, величины утонений и утолщений заготовки в зонах вытяжки.

Чтобы определить максимальную величину утонения, следует предположить, что наибольшее напряжение и соответственно наибольшее утонение наблюдаются в зоне границы перехода радиусной и цилиндрической частей. На радиусной части заготовки напряжения уменьшаются за счет активных сил трения в зонах контакта с инструментом и напряжений от изгиба. При расчётных малых степенях деформации за текущий переход считаем, что схема напряженного деформированного состояния заготовки линейная. Для расчёта интенсивности напряжений и деформаций используем уравнение кривой упрочнения степенного вида:

$$\sigma_i = A \cdot e_i^n,$$

где  $\sigma_i, e_i^n$  – интенсивности напряжений и деформаций,  $A, n$  – константы механических свойств, меридиональные напряжения приблизительно равны контактным  $\sigma_p \approx \sigma_s \approx 0$ , то есть имеем схему линейного напряженно-деформированного состояния изотропного тела:

$$e_s \neq 0, \quad e_s + e_p + e_s = 0, \quad e_p = e_s,$$

$$A = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_p) \cdot \psi_p^n}, \quad n = \delta_p, \quad \delta_p = \frac{\psi_p}{1 - \psi_p}.$$

Для линейной схемы напряженного состояния интенсивность напряжений равна  $\sigma_p$ :

$$\sigma_i = \sigma_p \text{ и } e_i = e_s \Rightarrow e_{s \min}. \text{ Тогда } \sigma_{\rho \text{MAX}} = A \cdot e_s^n,$$

$$e_s = - \left( \frac{\sigma_{\rho \text{MAX}}}{A} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad S_{\min} = S_3 \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{\rho \text{MAX}}}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \right],$$

$$S_{\text{CP}} = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \approx S_3.$$

Из условия постоянства объёмов заготовки и детали  $V_3 = V_d$ , не учитывая величину упругой деформации  $F_3 \cdot S_3 = F_d \cdot \bar{S}_d$ , где  $\bar{S}_d$  – толщина детали по средней поверхности ( $\bar{S}_d = S_3$ ), получаем условие равенства площадей при вытяжке:  $F_d = F_3$ , где условие равенства площадей детали и заготовки положено в основу определения деформаций при вытяжке любого элемента заготовки. Принимая с допустимой степенью точности схему деформаций аналогично как для фланцевой зоны заготовки, определим усилие процесса вытяжки и предельный коэффициент вытяжки по величинам деформаций как для фланцевой части (рис. 2).

Выделим на фланце бесконечно малый элемент двумя плоскостями, проходящими через ось детали, перпендикулярно к поверхности фланца и образующие между собой угол  $d\theta$  в предположении, что если хотя бы один из размеров элемента  $abcd$  имеет бесконечно малый размер, то элемент является бесконечно малым, и что этот элемент образован двумя концентрическими

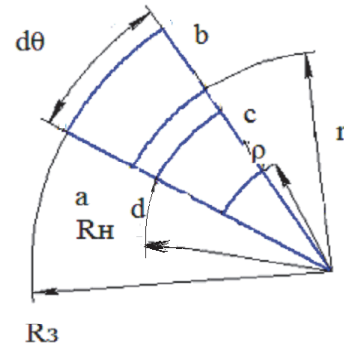


Рис. 2. Схема к определению деформаций в области радиусов переходов заготовки

окружностями, имеющими центр на оси симметрии и имеющие радиуса  $R_3$  и  $r$ . Рассмотрим стадию вытяжки, когда этот элемент находится в положении, ограниченном радиусами  $R_H$  и  $\rho$ .

Деформация любых тангенциальных точек определяется, если мы знаем длину до и после деформацию

$$e_{\theta R_H} = \ln \left| \frac{l_{a'b'}}{l_{ab}} \right| = \ln \left| \frac{2 \cdot \pi \cdot R_H}{2 \cdot \pi \cdot R_3} \right| = \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|,$$

$$e_{\theta \rho} = \ln \left| \frac{l_{d'c'}}{l_{dc}} \right| = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|.$$

Длина  $l_{\rho d'c'}$  задается  $l_{\rho d'c'} = \rho \cdot d\theta$ .

Длина исходного состояния этого элемента  $l_{dc} = r \cdot d\theta$ .

Находим величину тангенциальной деформации любого элемента с координатой  $\rho$ , если известна длина этого элемента до деформации или известны его координаты. Если известна зависимость  $r = f(\rho)$ , то мы получаем величину деформации  $e_q$  от независимой координаты  $\rho$ . Связь между  $r$  и  $\rho$  находим из условия равенства площадей рассматриваемых элементов до и после деформации.

$$F_{a'b'c'd'} = F_{abcd},$$

$$F_{a'b'c'd'} = (R_H^2 - \rho^2) \cdot d\theta,$$

$$F_{abcd} = (R_3^2 - r^2) \cdot d\theta,$$

$$F_{abcd} = (R_3^2 - r^2) \cdot d\theta,$$

$$r = \sqrt{R_3^2 - R_H^2 + \rho^2}.$$

Теперь можем найти  $e_q$ .

Для того, чтобы определить две другие деформации  $e_r$  и  $e_q$ , используем уравнение связи напряжений и деформаций:

$$e_s = - \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2 \cdot \sigma_\theta - \sigma_\rho} \cdot e_\theta,$$

$$e_\theta = - \frac{e_i}{\sigma_i} \left( \sigma_\theta - \frac{1}{2} \cdot \sigma_\rho \right), \quad e_s = - \frac{e_i}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}.$$

Согласно используемой методики будем считать, что соотношение напряжений в процессе

формообразования есть величина постоянная:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = const \text{ и не зависит от упрочнения матери-$$

ала и изменения его толщины.

Таким образом, рост напряжений за счет упрочнения в обоих случаях происходит пропорционально одному и тому же коэффициенту:

$$\frac{\sigma_\rho \cdot K_{упр}}{\sigma_\theta \cdot K_{упр}} = const.$$

Если меняется толщина заготовки, то меняются и величины напряжений

$$\frac{\sigma_\rho \cdot K_S}{\sigma_\theta \cdot K_S} = const.$$

Это условие позволяет определить деформации по отношению  $s_r/s_q$  и используя уравнения связей (найденных без упрочнения и изменения толщины) по известной одной из деформаций, найти другую деформацию.

$$e_S = -\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} + 1}{2 - \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}} \cdot e_\theta.$$

Найдем напряжения, действующие на фланце без учета упрочнения и изменения толщины.

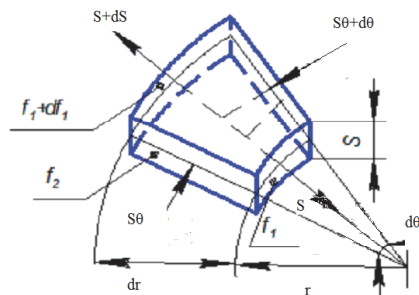


Рис. 3. Расчётная схема упруго-пластической деформации элемента заготовки

Составим уравнение равновесия на бесконечно малый элемент фланца заготовки.

Составим уравнение равновесия сил, действующих на координату  $P_{qr} = 0$ . По двум другим координатам уравнение равновесия сил составлять не будем в связи с тем, что они обращаются в тождества для заданных условий вытяжки:

$$\sum P_\theta = \sum P_\theta \sum P_S = \sum P_S$$

$$(\sigma_\rho + d\sigma_\rho) \cdot (f_1 + df_1) +$$

$$2 \cdot \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot \sin \frac{d\theta}{2} - \sigma_\rho \cdot f_1 = 0.$$

Раскрыв скобки, уберем величины, которые на порядок меньше остальных, а также учтем, что  $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ , тогда получим:

$$\sigma_\rho \cdot f_1 + d\sigma_\rho \cdot f_1 + \sigma_\rho \cdot df_1 + d\sigma_\rho \cdot df_1$$

$$+ \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot d\theta - \sigma_\rho \cdot f_1 = 0;$$

$$d\sigma_\rho \cdot f_1 + \sigma_\rho \cdot df_1 - \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot d\theta = 0.$$

Найдем значения площадей:

$$f_1 = \rho \cdot d\theta \cdot S, \quad f_2 = S \cdot d\rho.$$

Подставив (2) и (3) в (1) получим:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + \sigma_\theta = 0.$$

Уравнение (4) содержит 2 неизвестных  $s_r$  и  $s_q$ .

Условие пластичности по максимальным касательным напряжениям:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta \cdot \sigma_S.$$

$\beta = 1 \div 1,15$  определяет схему напряженного состояния, в нашем случае  $\beta \approx 1$ .

$$s_r > 0, \quad s_q < 0, \quad s_k = 0,$$

$$s_{\max} = s_r,$$

$$s_{\min} = -s_q,$$

Условие пластичности (без учета упрочнения)

(5) запишется следующим образом:

$$s_r - (-s_q) = s_{02},$$

Подставив в (4) уравнение (6), получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$d\sigma_\rho = -\sigma_{02} \cdot \frac{d\rho}{\rho}.$$

Проинтегрировав уравнение (7) получим:

$$s_r = -s_{02} \times \ln r + C.$$

Граничные условия:  $s_r = 0, r = R_H$ , тогда постоянная интегрирования

$$C = s_{02} \times \ln R_H.$$

В результате получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_{02} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{\rho} \right|.$$

При  $r = r_d$   $s_r$  будет максимальным.

$$e_\theta = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|, \quad r = \sqrt{R_S^2 - R_H^2 + \rho^2}, \quad e_\rho + e_\theta + e_S = 0. \text{ Эпюры}$$

изменения напряжений и деформаций на фланце при вытяжке

$$|l_{ab}| + |l_{cd}| = \sigma_{02}$$

$$|l_{a'b'}| + |l_{c'd'}| = \sigma_{02}$$

$$\sigma_{\rho \max} - (\sigma_{\theta \min}) = \sigma_{02}.$$

Такая методика позволяет уменьшить радиус закругления в зоне деформации, соответственно снижаются дополнительные напряжения и усилия для достижения заданных параметров деталей. Для повышения эффективности расчётов необходимо также учитывать величину возникающего изгибающего момента в местах неравномерного распределения напряжений или когда напряжения имеют один и тот же знак:

$$M_H = \frac{\sigma_{02} \cdot S^2}{4}.$$

Необходимое дополнительное напряжение

определяем из условия равенства работ от внешних и внутренних сил.

$$A_{BH} = A_B.$$

Работа внешних сил

$$A_{BH} = \Delta\sigma_{\rho H} \cdot S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S) \cdot dj,$$

где  $b = 1$  – единичная ширина,

$$S \cdot b = F, \quad (r_M + 0,5S) \text{ – плечо,}$$

Работа внутренних сил  $A_B = M_{II} \cdot dj$ .

Так как  $A_{BH} = A_B$ , то

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{\rho H} &= \frac{M_{II}}{S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S)} = \\ &= \sigma_{02} \frac{S^2}{4 \cdot S \cdot (r_M + 0,5S)} = \frac{\sigma_{02}}{2 \frac{r_M}{S} + 1}. \end{aligned}$$

Таким образом, с уменьшением

$$\frac{r}{S} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta\sigma_{\rho H} \rightarrow \sigma_{02}.$$

Соответственно предельный коэффициент вытяжки  $K_B^{ПРЕД}$  определим из условия:

$\sigma_{\rho \max} = \sigma_B$ , или:

$$\sigma_{\rho \max} = \left[ A \cdot (\psi_{\text{ш}} \cdot \ln K_B)^n \cdot \ln \left| \frac{R_n}{r_n} \right| + \frac{\sigma_s}{2 \cdot \frac{r_M}{S} + 1} + \frac{Q \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot S} \right] \cdot e^{f_{\text{тр}} j} = \sigma_B$$

Другими словами, если процесс вытяжки происходит в нестандартном режиме, то находим  $K_B^{ПРЕД}$ , то есть  $K_B^{ПРЕД} < K_B$ , а число переходов при вытяжки определяются следующим образом:

$$K_B = \frac{R_3}{r_A}, \quad K_B = \frac{R_3}{r_A} \cdot \frac{R_1}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_2} \dots \frac{R_{n-1}}{R_{n-1}}, \text{ или:}$$

$$K_B = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_1}{R_1} \dots \frac{R_{n-2}}{R_{n-1}} \cdot \frac{R_{n-1}}{r_A}, \text{ и в результате}$$

получим:

$$K_B = K_{B1} \times K_{B2} \times K_{B3} \times \dots \times K_{Bn},$$

то есть процесс можно разбить на  $n$  операций вытяжки.

Таким образом, коэффициенты вытяжки  $K_B$  на разных операциях должны быть различные

по величине, то есть на первых операциях  $K_B$  наибольший, на последующих он значительно меньше, примерно в  $1,5 \div 1,7$  раза, но напряжения в первом и последующих переходах в опасном сечении должны быть одинаковы, они не должны превышать предел прочности, аналогично как и при вытяжке на последующих переходах опасными сечениями не должны являться участки, прежде недеформируемые.

Возможности последующих операций вытяжки объясняется снижением коэффициента вытяжки или уменьшением зоны сопротивления очага деформации, поэтому последнее равенство запишем следующим образом: на последующих операциях приняты одинаковые коэффициенты, их число  $n-1$ , а на первом переходе – отличные от вышеуказанных. Тогда:

$$K_B = K_B \cdot K_{B2}^{n-1}.$$

Прологарифмировав данное выражение, в результате получим:  $\ln K_B = \ln |K_{B1}| + (n-1) \ln |K_{B2}|$ . Это позволяет найти число переходов вытяжки:

$$n = \frac{\ln |K_B| - \ln |K_{B1}|}{\ln |K_{B2}|} + 1.$$

Разработанная методика расчётов параметров формообразования заготовок позволяет реализовать одновременно схему профилирования при автоматизации процессов деформации в многопереходных калибрах, также требуется меньшее число переходов вытяжки и соответственно меньшее число деформирующего инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумадин А. С., Ершов В. И., Барвинок В. А. Основы технологии производства летательных аппаратов. М.: Наука и технологии, 2005. 912 с.
2. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст] / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Скворцов, Г.Л. Основы конструирования штампов для холодной штамповки [Текст] / Г.Л. Скворцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 345 с.

#### RESEARCH AND ANALYSIS OF PARAMETERS OF MULTITRANSITION TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PRODUCTION OF PROFILES OF DIFFICULT SECTION FOR MODULAR AND ASSEMBLY PRODUCTION OF AIRCRAFT

© 2015 S.F. Tlustenko

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The results of the theoretical research and methodology multijunction deformation of the main types of processes forming a pro-lei complicated cross-section. A theoretical study of ways to select pieces of material necessary physical and mechanical properties of the original pieces of different alloys and heat treatment conditions for the respective metal forming processes. The analysis of opportunities for different kinds of pieces of cold deformation with respect to the shaping of pro-profiles of various shapes and purposes. The necessary theoretical foundations schemes calculated deformations, the technique of choice recommendations address possible defects in products, processes and adjustments to improve the quality of products. The study of modes of technological pro-forming processes on the basis of modern software applications to automate the process of production preparation.

**Keywords:** degree of deformation on transitions, rolling mill, elastic-plastic deformation, anisotropy, stress-strain state, in-intensity stress and strain, constant mechanical properties, residual stresses.

Stanislav Tlustenko, Candidate of Technics, Associate Professor. E-mail: titan250@mail.ru