

УДК 629.73.002.2

ПРОЦЕДУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ СТЕСНЕННЫМ ИЗГИБОМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2010 И.М. Колганов, О.В. Перфильев, Ф.Е. Ляшко

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 14.05.2010

В статье авторы приводят основные процедуры технологического процесса изготовления тонкостенных профилей методом конечных элементов с использованием системы автоматизации проектирования версии 971 Ansys/LS-DYNA; приводят результаты исследований распределения главных деформаций и напряжений по зонам сгиба; представляют энергетические силовые зависимости для автоматизированного расчета крутящего момента верхнего ролика в зависимости от скорости пластического деформирования; подтверждают адекватность математической модели реальному процессу изготовления профиля; резюмируют характерное увеличение внутренней энергии к результату сил изготовления и др.

Ключевые слова: технологический процесс, тонкостенные профили, метод конечных элементов, система автоматизации проектирования, деформации, напряжения.

В отличие от теоретических расчетов, где есть значительные ограничения по размерам и форме заготовок, в программе нет ограничений по геометрическим параметрам, так как при создании конечно-элементной модели происходит разбиение заготовки любой сложности на элементарные ячейки.

Рост напряжений в тонкостенном профиле вызван особыми условиями деформации, возникающими при формовании в точке перегиба в стенке заготовки.

Для исследования процесса моделирования выбран профиль корытообразного сечения с геометрическими характеристиками: высота стенки $H=30$ мм, толщина заготовки $s_0=1,2$ мм, ширина полки $2c=36$ мм, ширина верхней полки $b=20$ мм, высота отбортовки $b_\delta=4$ мм (рис.1, а). Эти параметры профиля оптимальные, так как обеспечивают необходимую устойчивость при значениях $\sigma_{кр}$, приближенных к значениям пресованного профиля для полки и стенки [1, 2].

Технологический процесс изготовления профиля методом стесненного изгиба (СИ) из труднодеформируемой листовой заготовки предусматривает применение компактного, мобильного, модульного оборудования [3], [4].

Так, в запатентованной установке [5] технологический процесс изготовления профиля методом СИ из труднодеформируемой листовой заготовки предусматривает переходы предвари-

тельной подгибки и формообразования, при которых заготовке придается промежуточная форма предварительного профиля с радиусами гибки $R > 3s_0$ (рис. 1, б). Путем последовательной подгибки образуется требуемое поперечное сечение профиля. Формообразование происходит в клети окончательного перехода ВПУ, расстояние между осями валов составляет 150-180 мм.

В автоматизированной линии [4] заготовку смазывают, подвергают воздействию ультразвуковых колебаний, разделяют на две полосы различной ширины и направляют двумя ручьями в профилегибочный агрегат, затем ее профилируют в роликовых устройствах для одновременного изготовления профилей разной формы поперечного сечения.

Геометрическая модель процесса формования, представленная на (рис. 2. а) создавалась в программе Solid works. Межклетевое расстояние L было принято равным 210 мм. В работе использовался пре- и постпроцессор программы Ansys, а решателем служила программа LS-DYNA.

При решении задачи были приняты следующие основные допущения: эффект Баушингера

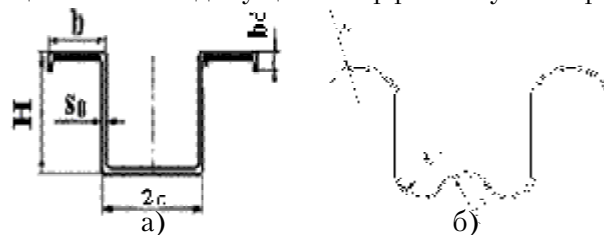


Рис. 1. Геометрические параметры корытообразной заготовки:

а – сечение рекомендуемого исследуемого профиля;
б – сечение заготовки

Ляшко Федор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, директор института. E-mail: aviafil@tc.ru.
Колганов Иван Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры “Самолетостроение”.
Перфильев Олег Владимирович, соискатель кафедры “Самолетостроение”. E-mail: oleg_perfiliev@mail.ru

не учитываем; коэффициент трения f между заготовкой и роликами примем 0,2; напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки определяется в любой заданный момент времени; примем изотермические условия деформации, то есть разогрев деформируемого материала и роликов не рассматриваем; в результате симметрии в расчет принимали S часть полной модели с соответствующими ограничениями; волочение-прокатку считаем холодной и примем, что сопротивление деформации не зависит от скорости ее деформации.

Материал роликов окончательного формообразования – сталь 9ХС. Материал заготовки – алюминивно-литиевый сплав 1451 изотропный, со степенным законом упрочнения.

Угловые скорости имеют значение для верхнего 8 рад/с и нижнего роликов 10 рад/с для выравнивания линейных скоростей; модель заготовки формируется из трехмерных твердотельных октаэдрических конечных элементов.

Для создания контактных поверхностей между инструментом и профилем использовали тип контакта forming surface-to-surface contact.

Конечно-элементная модель (см. рис. 2, б) была создана в программе ANSYS v11 и включала в себя 12812 оболочечных элементов на заготовке и 96960 объемных элементов на роликовом инструменте.

В последующих расчетах приняты механические характеристики заготовки [6]:

модуль упругости 1-го рода $E=79000$ МПа; напряжение сопротивления $\sigma_s=500$ МПа; массовая плотность $\rho=2630$ кг/м³.

Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

Результаты моделирования приведены на рис. 3 – 5.

За счет торцевого давления в торцы профиля и осадки дугообразной части заготовки возникают деформации сжатия. При этом увеличиваются деформации сжатия по внутреннему слою и уменьшаются деформации растяжения на наружном. Тангенциальные деформации растяжения по зоне №1 составили +8 %, радиальные деформации сжатия по внутреннему контуру +40 %. В зоне №2 происходит процесс чистой гибки без СИ. Очевидно, что в зонах сгиба сходных с данной (горизонтальная стенка с вертикальной стенкой), процесс осадки не происходит. В зоне №3 наблюдаются значительные деформации сжатия такие, что тангенциальные деформации на внутренней зоне уменьшаются до -22 %, а на наружном тангенциальные деформации растяжения переходят в деформацию сжатия до (-5 %), то есть вся зона находится в сжатом состоянии. Только присутствует аксиальная деформация растяжения (примерно +4 %).

На рис. 4(а, б) представлено характерное увеличение внутренней энергии и результирующей силы в процессе формования.

Максимальные значения главных радиальных напряжений по наружному контуру дости-

Таблица 1. Распределение главных деформаций по зонам сгиба

№ зоны/ элементов	Значения главных деформаций по внутреннему контуру, %			Значения главных деформаций по наружному контуру, %		
	Радиальные, ε_1	Аксиальные, ε_2	Тангенциальные, ε_3	Радиальные, ε_1	Аксиальные, ε_2	Тангенциальные, ε_3
1. 1308-1597	+40	+3	-42	-10	+1	+8
2. 1450-1558	+8	+3	-22	-8	+3	+20
3. 1472-1506	+25	+4	-28	-3	+4	-5

Таблица 2. Распределение главных напряжений по зонам сгиба

№ зоны/ элементов	Значения главных напряжений по внутреннему контуру, МПа			Значения главных напряжений по наружному контуру, МПа		
	Радиальные, σ_1	Аксиальные, σ_2	Тангенциальные, σ_3	Радиальные, σ_1	Аксиальные, σ_2	Тангенциальные, σ_3
1. 1308-1597	+150	-110	-220	-380	+100	+150
2. 1450-1558	+150	-100	-220	-80	+50	+150
3. 1472-1506	+150	+120	-50	-250	-50	+80

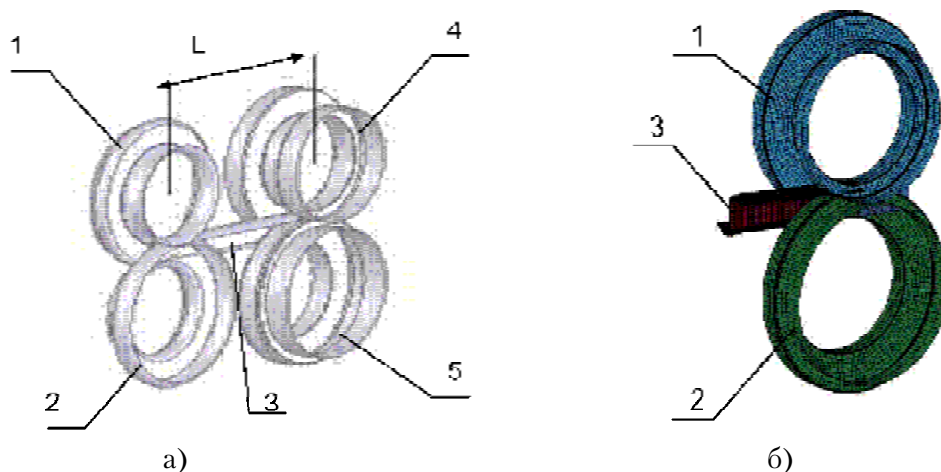


Рис. 2. Модели процесса формообразования:
 а – геометрическая модель для изготовления профиля корытообразного типа;
 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – заготовка;
 б – конечноэлементная модель для изготовления профиля корытообразного типа;
 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – заготовка; 4 – верхний ролик окончательного формообразования;
 5 – нижний ролик окончательного формообразования

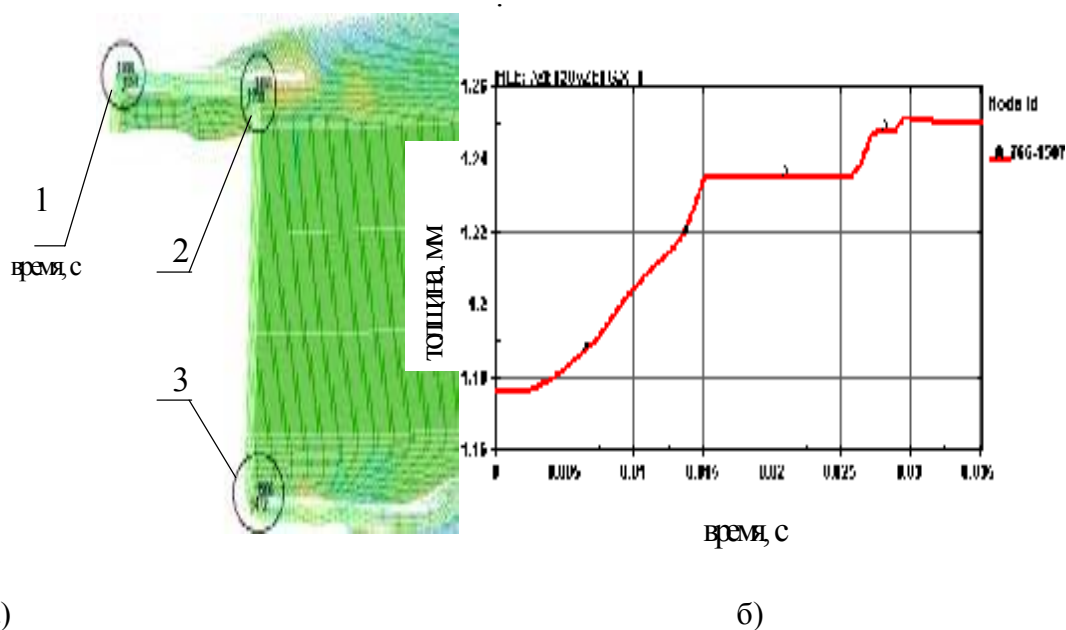


Рис. 3. Интенсификация главных напряжений и деформаций в заготовке:
 а – общий вид S полной модели заготовки; б – график изменения толщины в процессе профилирования;
 1 – концентрация главных напряжений и деформаций между отбортовкой и горизонтальной стенкой; 2 – концентрация главных напряжений и деформаций между вертикальной и горизонтальной стенкой; 3 – концентрация главных напряжений и деформаций у дна

гают значения до -380 МПа, поэтому имеются значительные деформации сжатия, то есть величины по внутренней зоне сгиба превышают величины по наружной зоне (см. табл. 2).

Аналогично, при использовании принятых выше допущений проведен анализ изменения толщины по зоне сгиба № 3 (см. рис. 3, а). На графике (рис. 3, б) можно выделить характерный временной интервал, в пределах которого наблюдается появление локальных экстремумов расчетных значений изменения толщины заготов-

ки. Пик изменения толщины в зоне сгиба (~1,23 мм) наблюдается через 0,015 с после начала захвата заготовки роликковыми парами. Спустя 0,005 с после захвата заготовки начинают вращаться калибрующие роликковые пары с заданной угловой скоростью по направлению профилирования, наблюдается вполне закономерный линейный процесс. Видно, что толщина по угловой зоне нижней полки изменяется в пределах от 1,18 до 1,24 мм, что составляет 6% (см. рис.3, б). В зоне около дна деформации сжатия

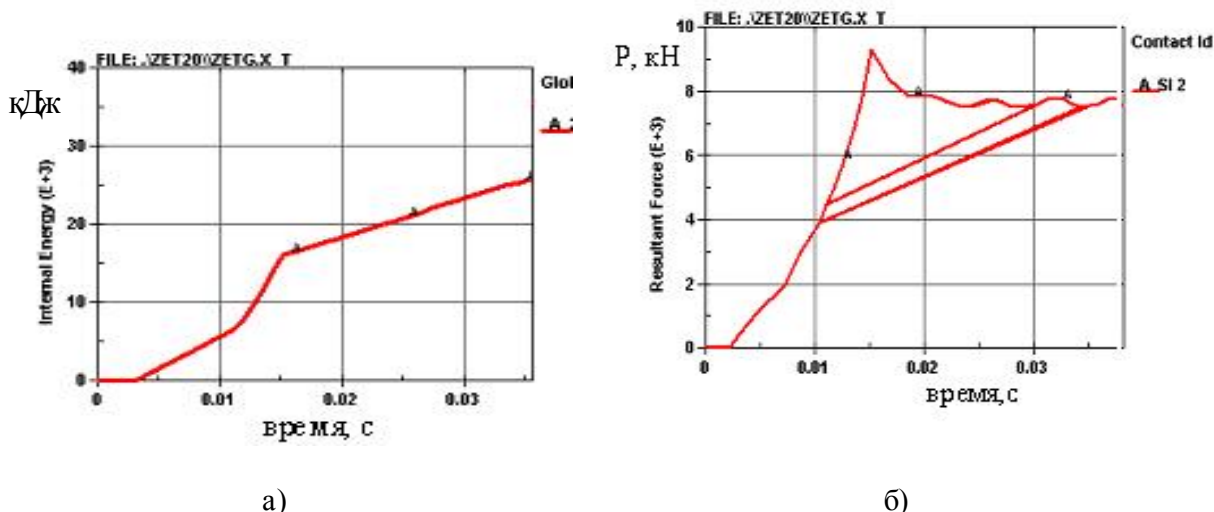


Рис. 4. Графики изменения величины:
а – внутренней энергии; б – результирующей силы

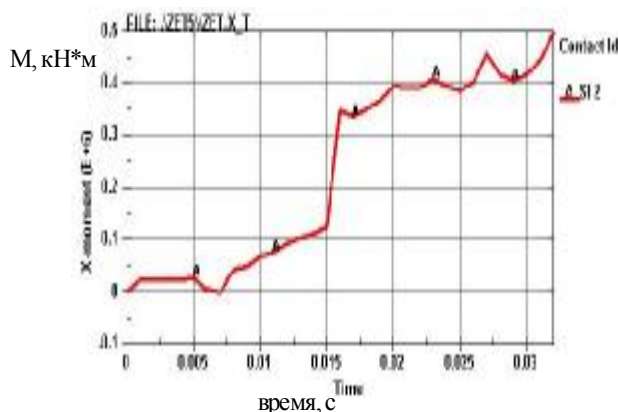


Рис. 5. График изменения крутящего момента на верхнем ролике

слишком велики, что соответствует ранее полученным исследованиям [4] и получению бездефектного профиля с утолщениями по зонам сгиба, близким к максимальным.

На основе проведенных экспериментальных исследований, рассчитанных в программе *Ansys/Ls-Dyna*, представлены энергосиловые зависимости для автоматизированного расчета крутящего момента верхнего ролика (рис. 5) в зависимости от скорости пластического деформирования.

На рис. 5 явно выражены резкие скачки величины крутящего момента на верхнем формирующем ролике. Пики соответствуют прохождению заготовки через ролики в момент времени $t = 0,015$ с. При перемещении верхнего ролика вниз со скоростью $V = 0,5$ м/с, через

0,005 с начинают вращаться калибрующие роликовые пары с заданной угловой скоростью по направлению профилирования.

Положительные результаты эксперимен-

тальных исследований подтверждают адекватность математической модели реальному процессу исследуемого способа формообразования профиля.

Таким образом, по результатам математического моделирования технологического процесса на последнем переходе в программе *ANSYS/LS-DYNA* были определены значения микропараметров (напряжения и деформаций по углам зоны сгиба тонкостенного профиля толщиной $s_0 = 1,2$ мм), изменения толщины и макропараметры (крутящий момент, результирующая сила, внутренняя энергия). Результаты проведенных математических исследований полностью соответствуют результатам проведенных теоретических исследований при отработке технологии формования из алюминиево-литиевого сплава 1451.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов И.М., Тонькин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки методом конечных элементов при формировании гнутолистового профиля стесненным изгибом // *Авиационная промышленность*. 2004. №1. С.34-37.
2. Колганов И.М. Разработка и внедрение прогрессивных технологий изготовления волочением-прокаткой профилей и гофров повышенной жесткости из листовых авиационных материалов: Дисс... докт. техн. наук. Самара, 2008. 213 с.
3. Патент № 2275264, МПК⁷ В21D/06. Клетевой модуль волочильно-прокатной установки // И.М. Колганов, О.В. Перфильев, Д.В. Петров. Оpubл. Б.И., 2006, №12.
4. Патент № 2269392, МПК⁷ В21D/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из труднодеформируемых листовых заготовок и автоматизированная линия для его реализации // И.М. Колганов, О.В. Перфильев, А.Ю. Небольсин, М.С. Максимов.

- Опубл. в БИ 2006. №4.
5. Патент № 2226441, МПК⁷ В21D/06. Способ изготовления тонкостенных профилей из труднодеформируемых листовых материалов и волочильно-прокатная установка для его реализации / И.М. Колганов, О.В. Перфильев, А.В. Тюнькин, П.Ю. Пакшин, С.В. Филимонов. Опубл. в БИ. 2004. №10.
6. ТР 1.4.2023-90. Изготовление профилей и деталей из листовых заготовок сплава марки 1451 методом стесненного изгиба. НИИТ. 1990. 32 с.

**PROCEDURES OF MODELLING OF PROCESSES OF MANUFACTURING
OF THIN-WALLED STRUCTURES BY THE CONSTRAINED BEND
BY THE METHOD OF FINAL ELEMENTS**

© 2010 I.M. Kolganov, O.V. Perfilyev, F.E. Lyashko

Institute of Aviation Technologies and Managements
Ulyanovsk State Technical University

In clause authors result the basic procedures of technological process of manufacturing of thin-walled structures by a method of final elements with use of system of automation of designing of version 971 Ansys/LS-DYNA; result results of researches of distribution of the main deformations and pressure on zones of a bend; represent power dependences for the automated calculation of the twisting moment of the top roller depending on speed of plastic deformation; confirm adequacy of mathematical model to real process of manufacturing of a structure; summarize characteristic increase in internal energy to result of forces of manufacturing, etc.

Key words: technological process, thin-walled structures, method of final elements, system of automation of designing, deformations, pressure.

*Fedor Lyashko, Doctor of Technics, Professor, Institute
Director. E-mail: aviafil@mv.ru.*

*Ivan Kolganov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft
manufacturing Department.*

*Oleg Perfilyev, Graduate Student Professor at the Aircraft
manufacturing Department. E-mail: oleg_perfiliev@mail.ru*