

УДК 621.981.011

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРУТОИЗОГНУТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБ МЕТОДОМ ПРОТАЛКИВАНИЯ

© 2013 В.Д. Маслов, К.А. Николенко, В.Д. Мисюра, К.А. Николенко

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

Приведены результаты экспериментального исследования процесса гибки крутоизогнутых патрубков методом вталкивания в фильеру под давлением. Показано, что наиболее опасным участком с точки зрения образования трещин является передний торец трубы.

Ключевые слова: изгиб трубной заготовки проталкиванием, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние.

В различных отраслях промышленности применяются конструкции, в которых используются элементы типа изогнутых отводов. Для повышения жесткости и улучшения компоновки требуются минимально возможные радиусы изгибаемых изделий [1]. К точности изготавливаемых деталей предъявляются повышенные требования.

Цель настоящей работы – разработать методику проектирования технологического процесса формообразования крутоизогнутых отводов, который должен обеспечить рациональные условия формоизменения и гарантировать отсутствие типичных технологических дефектов, таких как разрывы и гофры.

В обобщенном виде параметры крутоизогнутых отводов могут быть представлены в виде, показанном на рис. 1.

Геометрия крутоизогнутого отвода характеризуется следующими размерами: средним радиусом поверхности изделия R_{cp} , толщиной стенки патрубка t , углом изгиба β и протяженностью цилиндрических участков изделия на переднем и заднем торцах l_1 и l_2 .

Изготавливать отводы с минимально возможной величиной радиуса кривизны позволяет метод проталкивания трубной заготовки в канал матрицы с криволинейной осью. Трубная заготовка имеет либо внутренний деформируемый наполнитель, либо жесткую оправку, которая

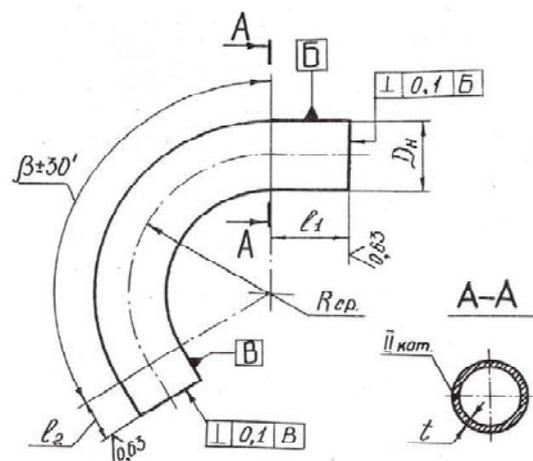


Рис. 1. Обобщенные геометрические характеристики крутоизогнутых отводов

вводится во внутреннюю полость трубной заготовки [2].

Для разработки методики проектирования процесса формообразования тонкостенных крутоизогнутых отводов, необходимо определить напряженно-деформированное состояние заготовки и определить особенности деформирования заготовки в данном процессе.

Очаг деформации при проталкивании трубной заготовки имеет сложный нестационарный характер. Изменяются его границы и граничные условия. Напряженно-деформированное состояние заготовки изменяется как во времени, так и при переходе от точки к точке. Большинство существующих до настоящего времени методик анализа формообразования элементов трубопроводов направлены (в основном) на определение энергосиловых параметров процесса [4]. Они не позволяют установить особенности деформирования заготовки без грубой схематизации процесса.

В настоящей работе предлагается методика

Маслов Валентин Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: avia-tek@yandex.ru

Николенко Кирилл Анатольевич, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: nik_kin_86@mail.ru

Мисюра Валентин Дмитриевич, студент инженерно-технологического факультета. E-mail: avia-tek@yandex.ru

Николенко Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: nik_kin_79@mail.ru

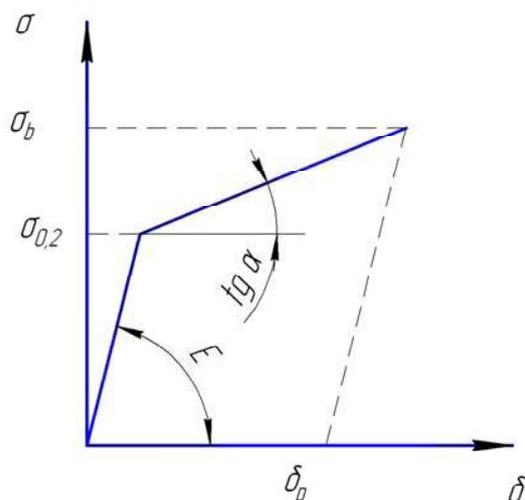


Рис. 2. Билинейная кривая упрочнения

определения параметров процесса формообразования крутоизогнутых деталей из трубных заготовок проталкиванием заготовки на основе моделирования данного процесса при помощи метода конечных элементов.

Способность метода конечных элементов решать сложные задачи механики при изменяющихся краевых условиях и нелинейном напряженно-деформированном состоянии дает возможность достоверно проанализировать поведение заготовки при формообразовании крутоизогнутых отводов.

Для моделирования процесса формообразования в выполняемых исследованиях использован конечно-элементный программный продукт – ANSYS-LS/DYNA [5]. Поведение материала заготовки описывается билинейной кривой упрочнения (рисунок 2). Модель материала оснастки (пуансона (толкателя), наполнителя и матрицы) - Rigid Material (твёрдое тело).

Для моделирования деформируемой заготовки выбран элемент SHELL 163 – оболочечный элемент с 4 узлами, возможностью изгиба и пружинения.

Элемент имеет 12 степеней свободы в каждом узле. Геометрия оснастки и заготовки построена в САД-системе КОМПАС-3D V8 с последующим импортированием в ANSYS/ LS-DYNA.

С целью получения достоверных результатов анализа, весь процесс формообразования разбивается на достаточно малые стадии и в пределах каждой стадии выполняется определение напряженно-деформированного состояния по всему объему заготовки. При переходе от стадии к стадии накопленные деформации и интенсивность деформации сохраняется для расчета на последующей стадии. На рисунке 3 показаны отдельные стадии процесса моделирования формоизменения.

Размер конечно-элементной сетки существенно влияет на результаты анализа. Более мелкое разбиение даёт лучшие по точности результаты. Однако аппроксимация модели большим количеством мелких элементов приводит к системе алгебраических уравнений большого порядка, что сказывается на скорости выполнения расчёта.

В табл. 1 показано влияние величины параметров сетки и скорости деформирования на результаты анализа при конечно-элементном моделировании процесса формообразования отвода.

В результате анализе использована сетка конечных элементов из четырехугольных элементов, имеющими размеры $L_i=6\text{мм}$.

Построение сетки конечных элементов представлено на рис. 4.

3D-модель заготовки после формообразования показана на рис. 5.

Для определения опасного сечения заготовки при формообразовании отвода в результате анализа процесса формообразования крутоизогнутого отвода становится возможным определить деформированное состояние заготовки и деформации изменения толщины по поверхности детали. Данные об изменении толщины и действующих напряжений выводятся с помощью цветовой шкалы и приведены на рис. 5.

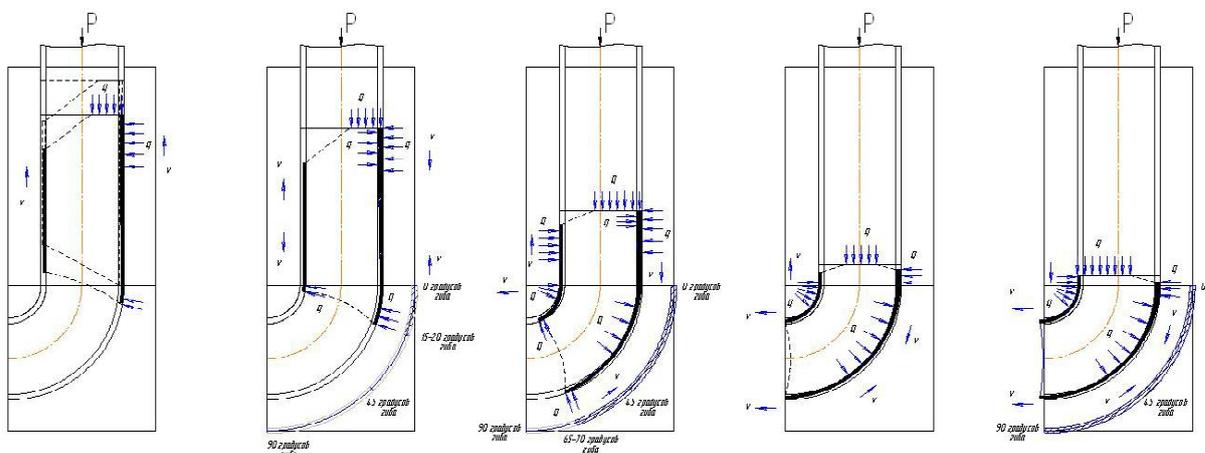
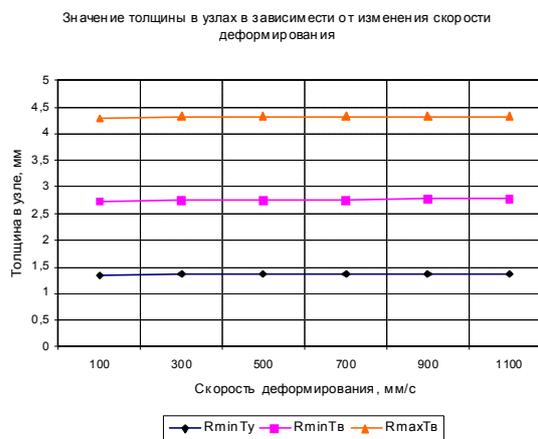
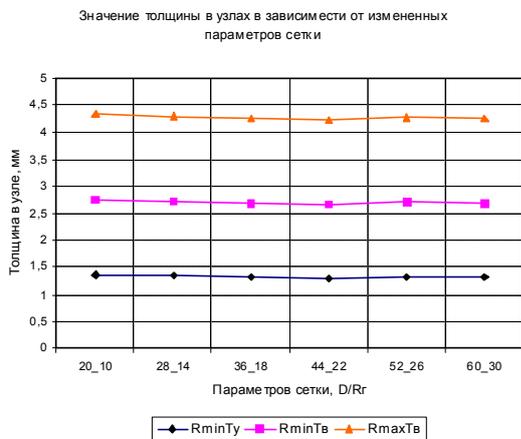


Рис. 3. Моделирование по стадиям формообразования крутоизогнутого патрубка

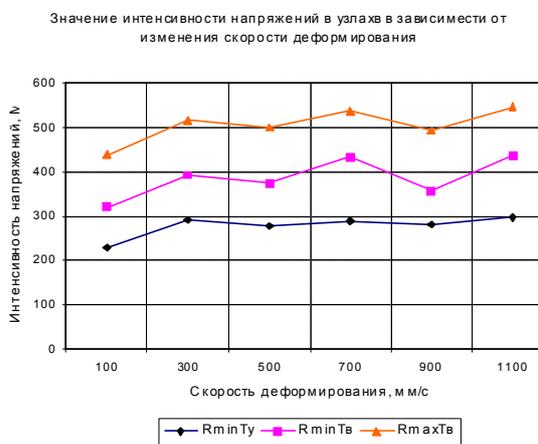
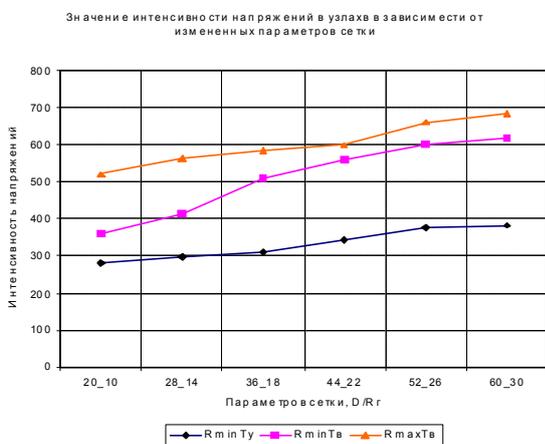
Таблица 1. Влияние параметров моделирования на результаты анализа

Изменение размеров ячейки координатной сетки
Интенсивность деформаций

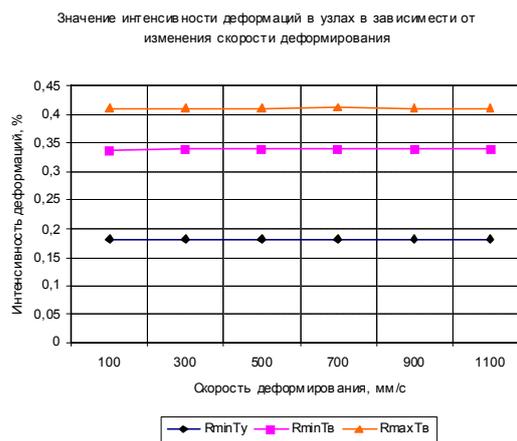
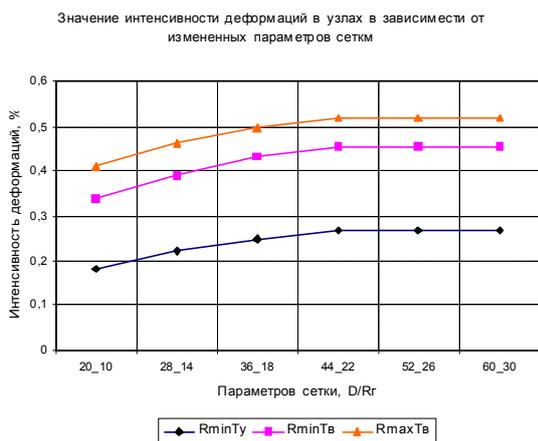
Изменение скорости перемещения пуансона
Интенсивность деформаций



Интенсивность напряжений



Толщина заготовки



Результаты исследования деформированного состояния заготовки представлены на рисунке 6. На этих же графиках приведены и теоретические кривые изменения толщины, полученные в результате компьютерного моделирования процесса формообразования отвода с использованием программного продукта ANSYS-LS-DINA.

Установлены следующие особенности деформирования трубной заготовки в штампе предлагаемой конструкции:

1. Максимальное утонение наблюдается на торцах штампованной детали со стороны минимального радиусагиба детали.
2. Со стороны образующей по максимальному радиусугиба утонение наблюдается в центральной части деформируемой заготовки.
3. Максимальная разнотолщинность штампованной детали не превышает 24 %.

На рис. 7 показано сравнение экспериментальных значений изменения силы (деформиро-

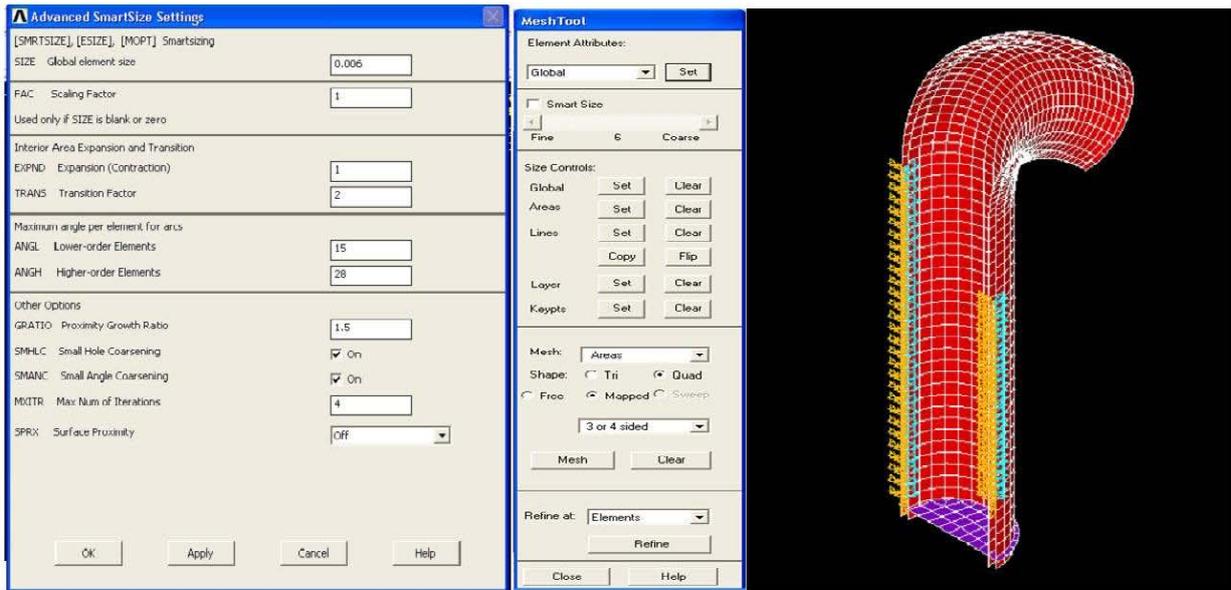


Рис. 4. Построение сетки конечных элементов

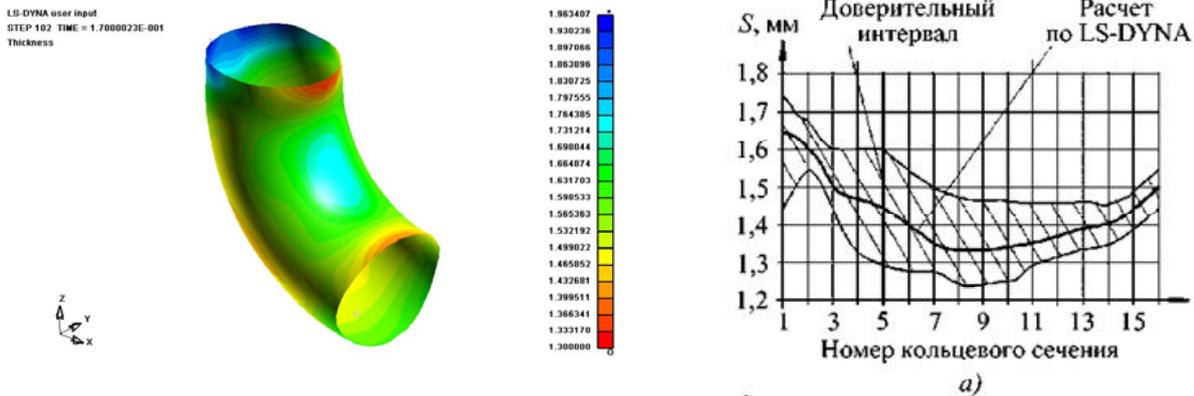


Рис. 5. Характер изменения толщины заготовки, полученный в результате расчета

вание заготовки диаметром 53мм с толщиной стенки 1,5 мм из коррозионно-стойкой стали 12X18H10T, смазка – машинное масло с наполнителем из графитового порошка) с теоретической кривой, полученной при моделировании процесса с помощью программного продукта ANSYS–LS-DYNA.

Характер изменения силы с увеличением хода пуансона позволяет сделать следующие выводы:

1. Сила деформирования максимальна на промежуточных стадиях процесса деформирования.
2. На силу деформирования влияют два фактора, соотношение между которыми в процессе деформирования изменяется: развитие очага деформации на начальной стадии деформирования и сокращение протяженности прямолинейного участка трубной заготовки на заключительной стадии деформирования.

Результаты исследований показали, что после того как сила достигает своего максимума, та часть заготовки, которая уже изогнута, в дальнейшем практически не деформируется. Она

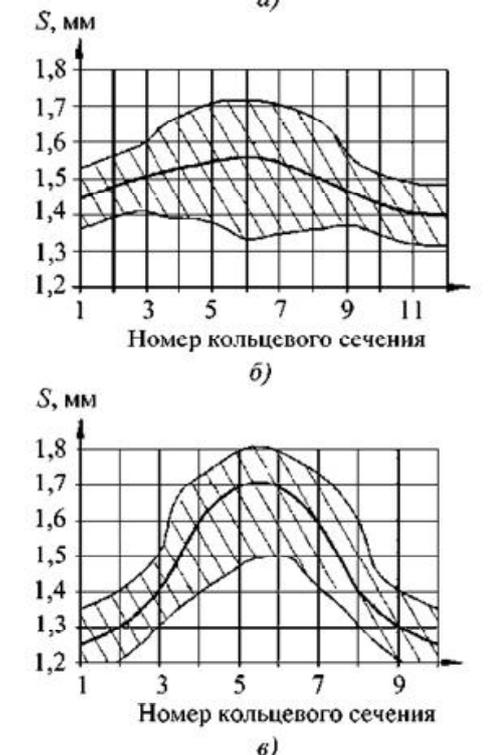


Рис. 6. Изменение толщины заготовки в меридиональном направлении: $a - R_{max}$; $б - R_{cp}$; $в - R_{min}$

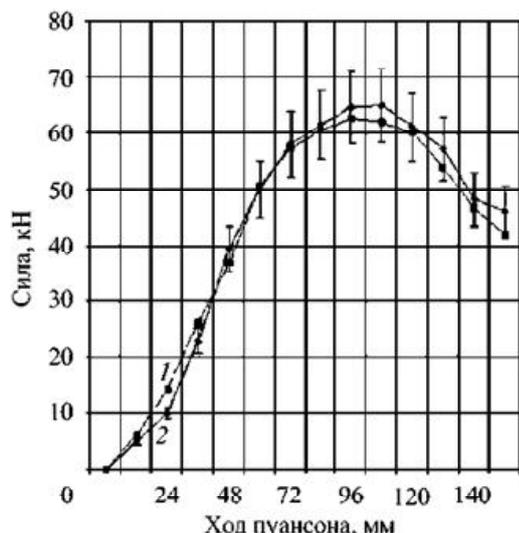
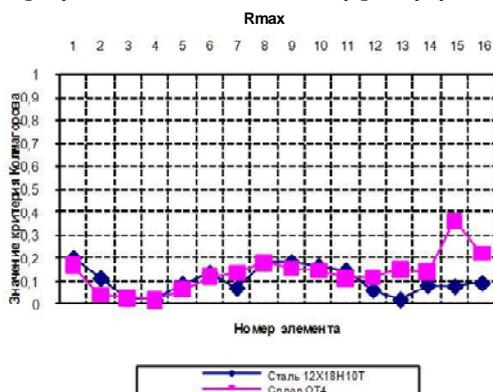


Рис. 7. Изменение силы деформирования по ходу процесса
1 – расчет по программам ANSYS и LS-DYNA;
2 – экспериментальные данные

лишь преодолевает силы трения, перемещаясь в зазоре между внутренней оправкой и рабочей поверхностью полуматрицы.

Для определения опасного сечения заготовки при формообразовании отвода воспользуем-

Распределение предельной степени деформации в меридиональном направлении (по радиусугиба) Образующая по максимальному радиусугиба – Rmax



Образующая по минимальному радиусугиба – Rmin

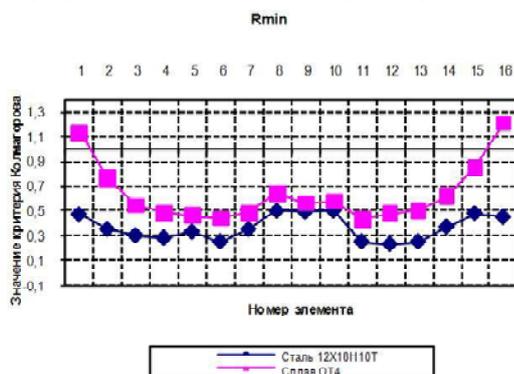


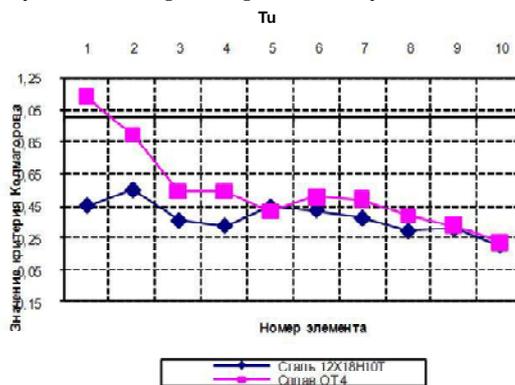
Рис. 8. Разрыв заготовок в опасном сечении при формообразовании отводов

ся критерием Колмогорова.

В соответствии с критерием Колмогорова образование трещин происходит при условии когда интенсивность накопленной деформации равна величине критической деформации при данной схеме напряженного состояния

$$\psi = \frac{\int_0^t d\varepsilon_i}{\varepsilon_{\rho}^{cc}} = 1 - \text{критерий Колмогорова};$$

Распределение предельной степени деформации в тангенциальном направлении (по диаметру детали) Образующая на торце, передающем усилие – Tu



Образующая на выходном торце - Tv

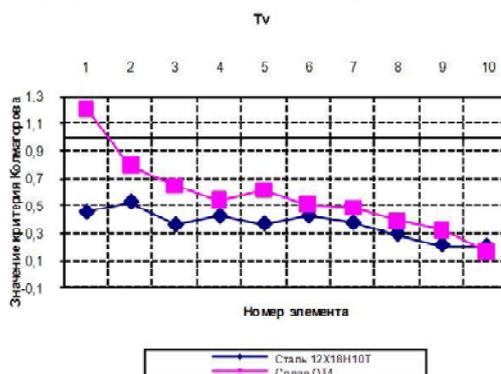


Рис. 9. Графики распределения критической степени деформации (по критерию Колмогорова) в меридиональном и тангенциальном направлениях на заключительной стадии процесса формообразования (уголгиба 90 градусов) для материалов заготовки - сталь 12X18H10T и сплав OT4

при $\psi \geq 1$ – происходит разрушение материала;

при $\psi < 1$ – разрушения не наблюдается;

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} -$$

интенсивность деформации;

$$\varepsilon_p^{cc} = 2\delta_p \exp\left[-2.16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right] - \text{предельная степе-}$$

нь деформации;

$\varepsilon_p = \delta_p$ – относительное равномерное удлинение образца;

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - \text{среднее значение на-}$$

пряжений в узле;

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} -$$

интенсивность напряжений.

Для расчета предельной степени деформации выбирались элементы в меридиональном и тангенциальном направлениях. В меридиональном направлении по максимальному радиусугиба, в тангенциальном направлении на торце передающем усилие и выходном торце (рисунок 9). Результаты представлены в виде графиков сравнения предельной штампуемости двух материалов: стали 12X18H10T и сплава ОТ4 на заключитель-

ной стадии процесса формообразования (уголгиба 90 градусов).

В результате анализа полученных графиков (рис. 9) можно сделать следующие выводы: при формообразовании отвода из стали разрушение не наблюдается. При этом наибольшая степень предельной деформации возникает на торце, передающим усилие и выходном торце по минимальному радиусугиба. При формообразовании отводов из сплава ОТ4 возникает разрушение на торцах по минимальному радиусугиба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П., Маслов В.Д., Николенко К.А. Формообразование тонкостенных крутоизогнутых отводов в жестких инструментальных штампах // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 1. 23 – 26 с.
2. Патент 130241 Российская Федерация МКП В21С 37/29. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов / Маслов В.Д., Николенко К.А., Мисюра В.Д.; заявитель и патентообладатель Самарский гос. аэрокосмич. университет. № 2013105307/02, заявл. 07.02.13; опубл. 20.07.13, Бюл. № 23. 3 с.
3. О новом подходе к формообразованию тонкостенных тройников / В.Д. Маслов, Ю.О. Петров, А.Ю. Северененко // Авиационная промышленность. 2013. № 2. С. 37 – 41.
4. Штамповка неравнопроходных тройников из трубных заготовок в разъемных матрицах // О.Ю. Давыдов, В.Г. Егоров, Ю.А. Невструев // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. №6. С.40 – 44.
5. LS-DYNA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cadferm.ru> (дата обращения 14.10.2013).

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FORMING PROCESS OF STEEPLY CURVED PIPES BY PUSHING

© 2013 V.D. Maslov, K.A. Nikolenko, V.D. Misyura, K.A. Nikolenko

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

There are presented the results of experimental study of the process of bending steeply-curved manifolds using the scheme of pushing the preform into the die hole under pressure. The most critical area with respect to arising cracks is shown to be leading edge of the tube preform.

Key words: the bending process by pushing, the stress-strain state, variation in thickness.

Valentin Maslov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Plastic Working of Metal Department.

E-mail: avia-tek@yandex.ru

Kirill Nikolenko, Graduate Student at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: nik_kin_86@mail.ru

Valentin Misyura, student at the Engineering and Technology Faculty. E-mail: Avia-tek@yandex.ru

Konstantin Nikolenko, Candidate of Technics, Associate Professor at the Plastic Working of Metal Department

E-mail: nik_kin_79@mail.ru