#### УДК 669.715

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ТОНКОСТЕННОГО ТРОЙНИКА ИЗ АНИЗОТРОПНОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

© 2013 Ф.В. Гречников, В.Д. Маслов, Ю.О. Петров, А.Ю. Севериненко, В.Д. Мисюра

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

#### Поступила в редакцию 19.09.2013

Рассмотрен вопрос получения аналитической зависимости, позволяющей определить значение толщины и значения деформации изменения толщины на различных участках заготовки при формообразовании равнопроходного тройника из трубной заготовки на примере трех материалов с различнымикоэффициентами анизотропии. Выявлены характерные участки деформации изменения толщины при формообразовании. Выведено уравнение, описывающее изменение толщины на участке сечения с максимальной разнотолщинностью.

Ключевые слова:напряженно-деформированное состояние, разнотолщинность, анизотропия, деформация, аналитическая зависимость, формообразование.

Одним из наиболее рациональных методов формообразования тонкостенных тройников, которые широко применяются при изготовлении трубопроводов летательных аппаратов, является холодная штамповка из трубной заготовки. В процессе штамповки совмещают формовку отвода на боковой поверхности трубной заготовки с осевым сжатием заготовки [1].

Для проектирования трубопровода необходимо знать значение толщины на различных участках штампованного тройника. Цель настоящего исследования – получить аналитические зависимости, позволяющие определить значения толщины и значения деформации изменения толщины на различных участках заготовки при формообразовании равнопроходного тройника из трубной анизотропной заготовки.

Аналитическое определение изменения толщины заготовки в процессе формообразования тройника является довольно сложной задачей. Очаг деформации 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

Іречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой обработки металлов давлением.

E-mail: Gretch@ssau.ru

настоящего времени методик анализа формообразования тройников направлены (в основном) на определение энергосиловых параметров процесса [2]. Они не позволяют установить особенности деформирования заготовки и разработать методику определения деформированного состояния при формообразования тройника.

В настоящей работе для определения напряженно-деформированного состояния заготовки использовано конечно-элементное моделирование процесса формообразования тонкостенного тройника с использованием программного продукта ANSYS-LS/DYNA [3].

Модель деформируемого металла при моделировании процесса – упрочняемый трансверсально анизотропный материал – Transverse Anisotropic Material (металл с нормальной анизотропией свойств). Величина нормальной анизотропии исходной трубной заготовки задается коэффициентом Лэнкфорда R [4]:

$$R = \frac{\varepsilon_{\mathbf{B}}}{\varepsilon_s}$$

где:  $\mathcal{E}_{\rm B}$ ,  $\mathcal{E}_{\rm s}$  – соответственно деформация сужения и деформация утонения образца при стандартном испытании на одноосное растяжение.

Деформационное упрочнение материала задается на основании экспериментальных данных по кривым упрочнения, полученным при испытании трубных заготовок на осадку, рис. 1 [5].

Основные механические свойства металлов, используемые при моделировании процесса формообразовании тройника, приведены в табл. 1 [5].

Для моделирования деформируемой заготовки выбран элемент SHELL 163 – оболочечный элемент с 4 узлами, возможностью изгиба и пружинения. Геометрия оснастки построена в САD-

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

Петров Юрий Олегович, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: Dyran3604@yandex.ru

Севериненко Антон Юрьевич, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: antonsever@yandex.ru Мисюра Валентин Дмитриевич, студент инженерно-технологического факультета. E-mail: avia-tek@yandex.ru



**Рис. 1.** Кривые упрочнения материала при деформировании трубных заготовок: 1 – АМг-3М; 2 – ОТ4; 3 – 12Х18Н10Т; 4 – ПТ-7М

Таблица 1. Механические свойства материалов, применяемых при изготовлении тройников

№ п/п	Сплавы	Предел прочности	Предел текучести	Относит.равномерное удлинение	Величина параметра
		σ <sub>b</sub>	$\sigma_{s}$	$\delta_p\%$	анизотропии
		$\kappa\Gamma/MM^2$	$\kappa\Gamma/MM^2$	-	заготовки
					R
1.	АМг3	28	10	18	0,65
2.	12X18H10T	75	38	42	1,00
3.	OT4	80	40	15	3,54
4.	ПТ-7М	90	45	21	2,75

системе КОМПАС-3DV8 с последующим импортированием в ANSYS/LS-DYNA.

Проанализированы три варианта процесса изготовления тройников из материалов с различной величиной коэффициента анизотропии – алюминиевый сплав АМг-3М (R = 0,65), хромоникелевая сталь аустенитного класса 12Х18Н9Т (R = 1,01) и титановый сплав ПТ-7М (R = 2,75). При прочих равных условиях процесса формообразования изменялась только величина коэффициента нормальной анизотропии R.

Выполненное моделирование процесса формообразования тройника дает возможность определить величины деформаций и напряжений в любой точке деформируемой заготовки в любой момент времени процесса. Результаты моделирования процесса формообразования тройника приведены на рис. 2. Для сокращения времени анализа напряженно-деформированного состояния моделирование выполнялось на ј части заготовки.

Анализа результатов процесса моделирования [3] показал, что основные деформации изменения толщины наблюдаются на образующей, которая проходит от полюса формуемого отвода к верхней точке торца заготовки. Именно по деформациям на этой образующей и анализируется влияния анизотропии на деформированное состояние заготовки. В остальных сечениях за-



**Рис. 2.** Изменение толщины деформируемой заготовки, полученное в результате моделирования процесса

готовки (на образующей, расположенной в горизонтальном сечении, проходящем через ось заготовки, и на образующей, расположенной с противоположной стороны от формуемого отвода) толщину заготовки с точностью до 5 % можно считать неизменной.

Графические зависимости изменения толщины по верхней образующей при формообразовании равнопроходного тройника из заготовок, имеющих различные значения величины анизотропии R, приведены на рис. 3.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что минимальное изменение толщины, из трех рассматриваемых материалов, наблюдается на титановом сплаве ПТ-7М (R = 2,75). Он меньше утоняется в полюсе формуемого отвода и меньше утолщается на торце заготовки в зоне приложения сжимающей нагрузки. Максимальное изменение толщины наблюдается при формообразовании тройника из алюминиевого сплава АМг-3M (R = 0,65). В анализе используются логарифмические деформации изменения толщины

$$e_s = \frac{\ln S_k}{S_0}$$

где: S<sub>0</sub> и S<sub>к</sub> – соответственно исходная и конечная толщина деформируемойтрубнойзаготовки.

Результаты анализа изменения толщины деформируемой заготовки, полученные в результате моделирования процесса формообразования, приведены в табл. 2.

Построим аналитическую зависимость изменения деформации по толщине на торце заготовки. Примем допущение, что эта зависимость деформации изменения толщины от показателя анизотропии R на торце заготовки имеет линейный закон, то есть ее можно описать уравнением:

## y=ax+b,

где у-деформация изменения толщины е;

*х* – показатель анизотропии R;

*а*, *b* – коэффициенты уравнения.

Для определения коэффициентов уравнения результаты моделирования обработаны методом наименьших квадратов.



**Рис. 3.** Изменение толщины на различных участках заготовки в зависимости от свойств материала (коэффициента анизотропии)

**Таблица 2.** Значения толщины и деформаций изменения толщины в различных точках деформируемой заготовки

Материал	Латериал Полюс формуемого		Вертикальная стенка отвода		Торец цилиндрической	
заготовки	о тво да				заготовки	
	Толщина	Деформация	Толщина	Деформация	Толщина	Деформация
	заготовки	es	заготовки	es	заготовки	es
	MM		MM		MM	
АМг-3М	1,661	- 0,186	1,894	- 0,054	2,280	0,131
R = 0,65						
12X18H10T	1,721	- 0,150	1,964	- 0,018	2,170	0,081
R = 1,01						
ПТ-7М	1,809	- 0,100	2,024	0,012	2,085	0,041
R = 2,75						

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_{i} y_{i} = a \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} + b \sum_{i=1}^{n} x_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} y_{i} = a \sum_{i=1}^{n} x_{i} + nb \end{cases}$$

Подставив значения деформаций из табл. 2 в систему нормальных уравнений (1), найдем значения коэффициентов а и b. Расчетный бланк для решения нормальных уравнений приведен в табл. 3.

$$\begin{cases} 0.2804 = a \cdot 8.985 + b \cdot 4.4 \\ 0.2538 = a \cdot 4.4 + 3 \cdot b \\ b = 0,138. \end{cases}$$
(2)

Таким образом, линейная зависимость величины деформации изменения толщины заготовки на ее торце от показателя анизотропии R бу-

дет иметь следующий вид:  $e_{\circ}(mopey) = 0,138 - 0,036 \bullet R.$ 

Выполняя такое же решение для точки в полюсе формуемого отвода, (расчетный бланк для определения коэффициентов уравнения приведен в табл. 4), получим линейную зависимость для определения деформации изменения толщины е<sub>s</sub> (полюс) е<sub>•</sub> (полюс) = -0,03627 • R + 0,1378.

На рис. 4 приведена графическая интерпретация закономерностей изменения деформаций по толщине заготовки на торце и в полюсе формуемого отвода в зависимости от коэффициента анизотропии R.

Зная зависимости изменения величины деформаций по толщине в точках на торце и полюсе, построим аналитическую зависимость изменения толщины по образующей заготовки. Эту закономерность будем искать в виде параболической зависимости, показанной на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что имеются три характерные зоны на деформируемой заготовке:

1 - участок, прилегающий к торцу, на котором происходит увеличение толщины заготовки, с ее максимальным значением на торце.

2 - участок, прилегающий к полюсу формуемого отвода заготовки, где происходит уменьшение толщины, с минимальным значением толщины в полюсе.

3- участок перехода от цилиндрической части заготовки к вертикальной стенке формуемого отвода, где происходит изменение знака величины деформации по толщине, и где ее значение можно принять за ноль.

Габлица 3. Расчетный бланк для определения коэффициентов уравнения
методом наименьших квадратов для зоны торца заготовки

	АМг-ЗМ	12X18H10T	ПТ-7М	Сумма
$S_k$	2,280	2,170	2,085	
So	2	2	2	
y=e <sub>s</sub>	0,131	0,0811	0,0411	0,254
x =R	0,65	1,0	2,75	4,4
$\mathbf{x}^2$	0,423	1	7,563	8,985
ху	0,085	0,0815	0,114	0,280

Таблица 4. Расчетный бланк для определения коэффициентов уравнения методом наименьших квадратов для зоны полюса заготовки

	АМг-3М	12X18H10T	ПТ-7М	Сумма
$S_k$	1,661	1,721	1,809	
$S_o$	2	2	2	
$y = e_s$	- 0,186	- 0,150	- 0,100	- 0,436
x <b>=</b> R	0,65	1,0	2,75	4,4
$x^2$	0,423	1	7,563	8,985
ху	- 0,1209	- 0,15	- 0,275	-0,5474



**Рис. 4.** Линейная зависимость влияния показателя анизотропии на деформацию изменения толщины заготовки  $e_s = f(R)$ 



**Рис. 5.** Характер изменения величины деформации по толщине вдоль образующей деформируемой заготовки

Зададим закон изменения деформации по толщине вдоль образующей деформируемой заготовки уравнением второго порядка:

$$y_i = a_0 + a_1 l_1 + a_2 l_i^2,$$
 (3)

где:  $y_i$  – деформация изменения толщины  $e_s$ ;  $l_i$  – относительная безразмерная длина обра-

 $l_i^-$  относительная освразмерная длина обр. зующей заготовки.  $l_i = l/D$ ,

*l* – текущее значение длины образующей, измеряемое от торца деформируемой заготовки;

*D* – диаметр исходной трубной заготовки для изготовления тройника.

В соответствии с геометрией нормализованных тройников для изготовления трубопроводов летательных аппаратов [5], для равнопроходных тройников  $l_i$  (текущее значение относительной длины) изменяется в пределах от значения 0 на торце заготовки до значения 1,5 в полюсе формуемого отвода. Подставляя значения переменных, получим систему уравнение с тремя неизвестными:

В результате решения этой системы получаем: a<sub>0</sub> = e<sub>s</sub>(торец);

a<sub>1</sub> = - (1,667•е<sub>s</sub>(торец) + 1,33 е<sub>s</sub>(полюс))

 $a_2 = -1,33 \cdot e_s(полюс) + 0,667 \cdot e_s(торец),$ 

где, в свою очередь:

 $e_{s}(nonoc) = 0,0359 \bullet R - 0,1979$ 

 $e_{s}(mopeu_{s}) = 0,138 - 0,0363 \bullet R$ 

Таким образом, получившееся уравнение описывает изменение толщины на участке сечения с максимальной разнотолщинностю.

Разработанные аналитические зависимости позволяют с достаточной для практических расчетов точностью определить толщину и деформации изменения толщины анизотропной трубной заготовки при формообразовании равнопроходного тройника.

Достоверность разработанной методики определения толщины подтверждена при изготовлении тройников из титанового сплава ПТ-7М, показанных на рис. 6.



**Рис. 6.** Партия тонкостенных тройников, изготовленных из титанового сплава ПТ-7М

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Устройство для формообразования тройников Патент на полезную модель. № 67487. Опубл. 27.10.2007. Бюл. № 30.
- 2. Давыдов О.Ю., Егоров В.Г., Невструев Ю.А. Штамповка неравнопроходных тройников из трубных заготовок в разъемных матрицах // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. №6. С. 40 – 44.
- Попов И.П., Маслов В.Д., СевериненкоА.Ю. Применение CAD/CAE-систем в исследовании процессов формообразования тонкостенных тройников // САПР и графика. 2012. №1. С. 86-88.
- 4. *Гречников Ф.В.* Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
- Формообразование нормализованных элементов трубопроводных систем на универсальных гидропрессах. Технологические рекомендации. Харьковский филиал НИАТ. Харьков, 1985. 83 с.

# **REGULARITIES OF DEFORMATION IN FORMING** A THIN-WALLED T-JOINTS TUBES OF ANISOTROPIC TUBE STOCK

© 2013 F.V. Grechnikov, V.D. Maslov, Yu.O. Petrov, A.Yu. Severinenko, V.D. Misyura

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

Considered the question obtaining analytical relationship, which allows to determine the thickness and strain values??change in thickness in different parts of the workpiece in forming equal passt-joint tube from the billets on the example of three materials with different coefficients of an isotropy. Revealed the characteristic changes in the thickness of land deformation in forming. Equation is derived describing the change in thickness of the site with a maximum polythickness.

Key words: the stress-strain state, variation in thickness, anisotropy, strain, analytical dependence, shaping

Fedor Grechnikov, Professor, Member-Correspondent of RAS, Doctor of Technics, Head at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: Gretch@ssau.ru

Valentin Maslov, Associate Professor at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: avia-tek@yandex.ru.

Yuri Petrov, Graduate Student at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: Dyran3604@yandex.ru.

Anton Severinenko, Graduate Student at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: antonsever@yandex.ru.

Valentin Misyura, Student at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: Avia-tek@yandex.ru.