

УДК 621.9+004.9

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРОЙНИКОВ

© 2014 И. П. Попов, А. Ю. Севериненко, Ю. О. Петров

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

В статье представлен новый способ формообразования тонкостенных равнопроходных тройников. Применён конечно-элементный программный продукт ANSYS/LS-DYNA для анализа качества получаемых тройников и сравнения со способом получения тройника отбортовкой. Произведён анализ разнотолщинности тройников и доказана эффективность предложенного способа формообразования.

*Тонкостенные равнопроходные тройники, компьютерное моделирование, формообразование, ANSYS/LS-DYNA, отбортовка, разнотолщинность.*

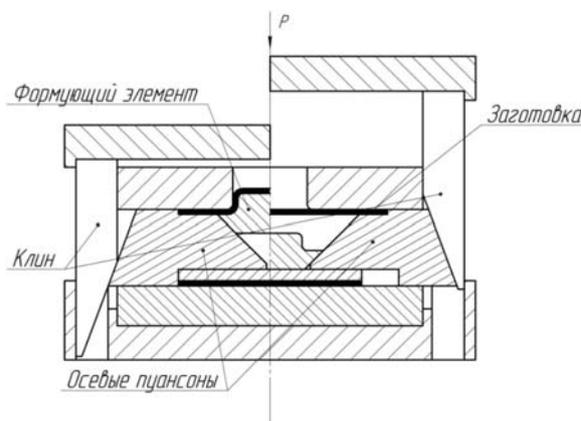
Задача повышения качества и уменьшения стоимости тонкостенных тройников (рис. 1), которые широко применяются как в трубопроводах авиационно-космической техники, так и в технологических трубопроводах предприятий перерабатывающих отраслей промышленности, по настоящее время не решена в полном объёме. Имеются проблемы как в технологии изготовления тройников, так и в конструкции устройств для её реализации.

Наиболее рациональным способом формообразования тройников является штамповка из трубной заготовки, в которой осуществляется осевое сжатие заготовки с одновременной формовкой отвода на боковой поверхности трубы [1, 2]. На основе этого способа была разработана полезная модель штампа для формообразования тонкостенных равнопроходных тройников [3, 4]. Схема штампа для формообразования тройников с основными конструктивными элементами представлена на рис. 2.

Рассматриваемый способ формообразования мало изучен. В частности, нет данных о качестве получаемых тройников и, следовательно, эксплуатационной надёжности тройника, что не позволяет внедрить данный способ в промышленное производство.



Рис. 1. Типовой тройник

Рис. 2. Схема штампа  
для формообразования тройников

В работе проведено компьютерное моделирование формообразования тонкостенных равнопроходных тройников, в котором осуществляется осевое сжатие заготовки с одновременной формовкой отвода на боковой поверхности трубы с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе ANSYS/LS-DYNA.

В качестве примера для компьютерного моделирования был взят тройник  $\varnothing 50$  мм из нержавеющей стали 12X18H10T ( $\sigma_{0,2} = 236$  МПа;  $\sigma_{\sigma} = 530$  МПа;  $E = 210$  ГПа;  $\nu = 0,34$ ;  $\delta_5 = 38\%$ ) с толщиной стенки 1,5 мм (рис. 3). Материал рабочих частей штампа, инструментальную сталь У8А ( $E = 209$  ГПа,  $\nu = 0,3$ ), принимали жёстким.

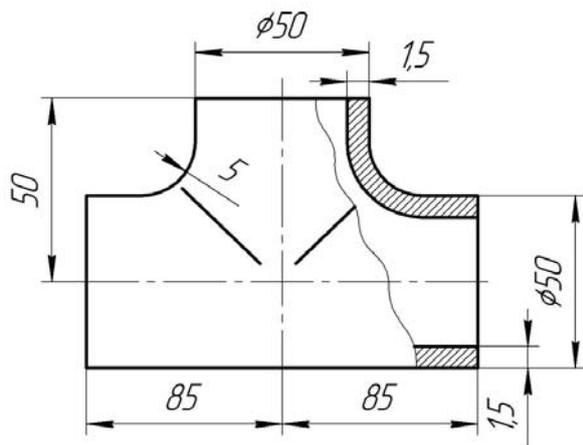


Рис. 3. Исследуемый тройник

Для описания материала тройника принята модель упрочняющейся упруго-пластической среды – билинейная изотропная модель:

$$\sigma_i = \sigma_{0,2} + E'e_i,$$

где  $\sigma_i$  – напряжение течения;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $e_i$  – накопленная интенсивность деформаций;  $E'$  – модуль упрочнения:

$$E' = \frac{\sigma_{\sigma} - \sigma_{0,2}}{\ln(1 + \delta) + (\sigma_{\sigma} - \sigma_{0,2})/E},$$

$\sigma_{\sigma}$  – предел прочности;  $\delta$  – относительное удлинение;  $E$  – модуль упругости.

С целью сокращения времени расчёта моделирование формообразования тройника осуществлялось на  $1/4$  части заготовки, симметрично разрезанной по оси симметрии и середине тройника. Для построения трёхмерной упорядоченной сетки конечных элементов выбрали оболочечные элементы. Конечно-элементная сетка тройника была сгенерирована с использованием 1920 элементов (длина ребра элемента 1 мм), рабочих частей штампа – 1936 элементов (0,5 мм) (рис. 4).

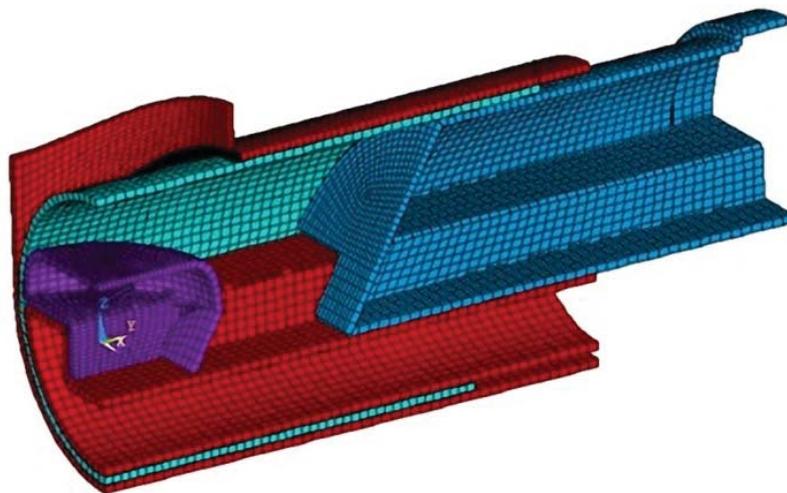


Рис. 4. Конечно-элементная сетка тройника и рабочих частей штампа

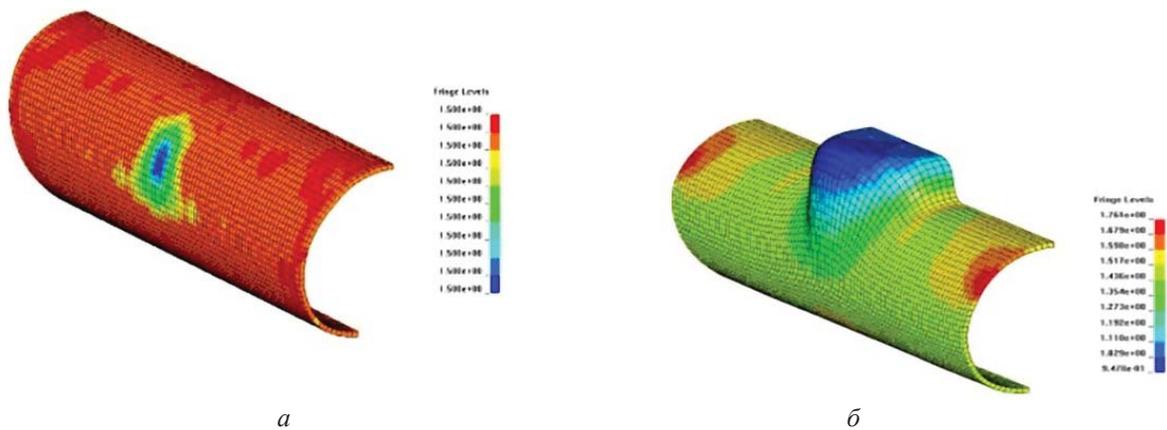


Рис. 5. Стадии моделирования процесса формообразования тройника:  
 а - исходное состояние заготовки; б - завершающая стадия формообразования

На рис. 5 в качестве примера показаны исходное состояние заготовки (а) и конечная стадия формообразования тройника (б).

Для доказательства эффективности нового способа формообразования было проведено сравнение с традиционными методами изготовления тройников. В качестве примера был выбран способ получения тройников с помощью отбортовки (рис.6).

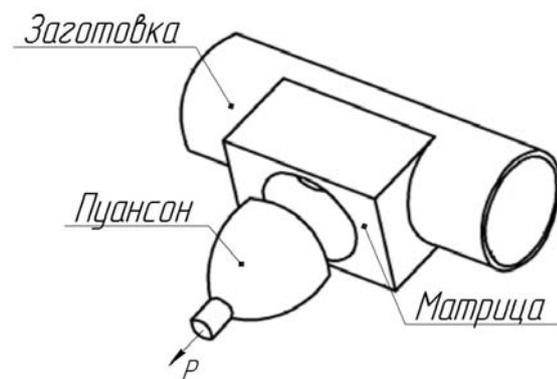
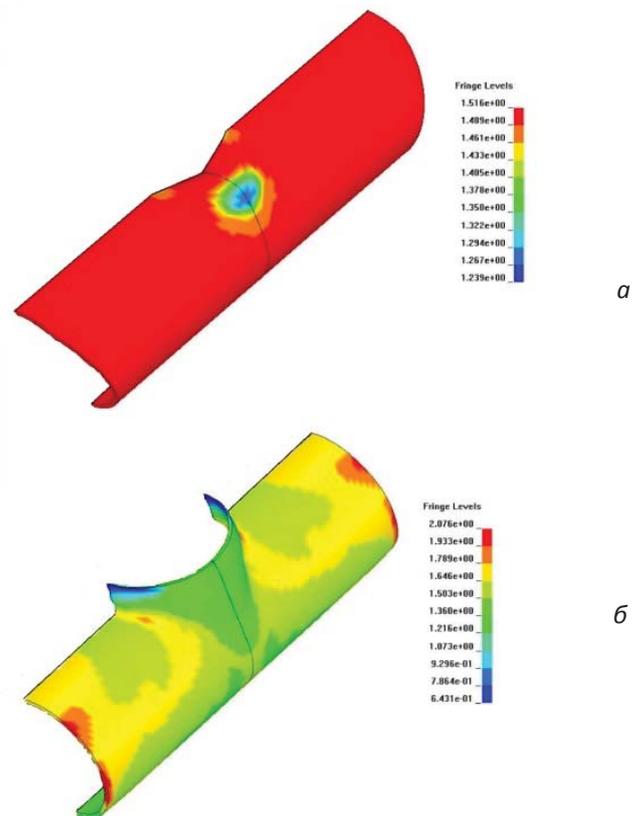


Рис. 6. Схема получения тройников отбортовкой

Рис. 7. Стадии моделирования процесса формообразования тройника отбортовкой:  
 а - исходное состояние заготовки;  
 б - завершающая стадия формообразования

Было произведено аналогичное моделирование, результаты которого представлены на рис. 7.

С целью оценки качества готовых тройников, полученных двумя способами, был произведён замер толщины по схеме, приведённой на рис. 8.

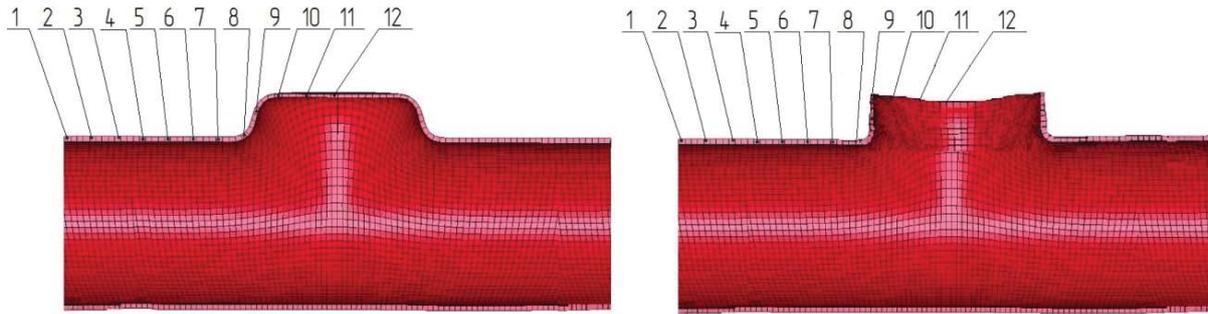


Рис. 8. Схема замера толщины

Для оценки разнотолщинности был введён коэффициент

$$y = \sqrt{\sum (S_0 - S_k)^2}$$

где  $S_0$  – толщина материала в измеряемой точке до начала формообразования,

$S_k$  – толщина материала в измеряемой точке после формообразования. Значения коэффициента  $y$  для двух способов формообразования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициента разнотолщинности  $y$ 

Номера точек	Осевое сжатие с одновременной формовкой			Отбортовка		
	$S_k$ , мм	$S_0$ , мм	$(S_0 - S_k)^2$ , мм <sup>2</sup>	$S_k$ , мм	$S_0$ , мм	$(S_0 - S_k)^2$ , мм <sup>2</sup>
1	1,59592	1,5	0,00920	1,5	1,5	0
2	1,58783	1,5	0,00771	1,5	1,5	0
3	1,58224	1,5	0,00676	1,5	1,5	0
4	1,56905	1,5	0,00477	1,5	1,5	0
5	1,54644	1,5	0,00216	1,5	1,5	0
6	1,51345	1,5	0,00018	1,5	1,5	0
7	1,50668	1,5	0,00004	1,5	1,5	0
8	1,50507	1,5	0,00003	1,5	1,5	0
9	1,48356	1,5	0,00027	1,40224	1,5	0,00956
10	1,47257	1,5	0,00075	1,35345	1,5	0,02148
11	1,49934	1,5	0,0000044	1,20667	1,5	0,08604
12	1,49937	1,5	0,0000004	0,99378	1,5	0,25625
$y$ , мм	–	–	<b>0,17853</b>	–	–	<b>0,611</b>

Из табл. 1 видно, что разнотолщинность тройника, полученного с помощью нового способа (0,17853), меньше в 3 раза, чем разнотолщинность тройника, полученного традиционным способом (0,611) – отбортовкой. Это свидетельствует о более высоком качестве и, следовательно, эксплуатационной надёжности тройника.

Разработанный способ формообразования тройников апробирован на ОАО

«Авиакор – авиационный завод», для чего разработан промышленный штамп. Осуществлена проверка результатов компьютерного моделирования, аналитических зависимостей и основных технологических параметров. Изготовлена партия деталей, обладающих минимальным уровнем разнотолщинности при формообразовании.

### Библиографический список

1. 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.
2. Формообразование нормализованных элементов трубопроводных систем на универсальных гидропрессах. Технологические рекомендации. / Харьковский филиал НИАТ. – Харьков, 1985.
3. Титов Р.С., Гилимзянов Ш.Н., Антропов В.В., Маслов В.Д., Попов И.П. Устройство для формообразования тройников - Патент на полезную модель. № 67487. Опубл. 27.10.2007. Бюл. № 30.
4. Северенко А.Ю., Петров Ю.О., Маслов В.Д., Гречников Ф.В. Устройство для формообразования полых тройников - Патент на полезную модель. № 119655. Опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.

### Информация об авторах

**Попов Игорь Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [ig\\_popov@mail.ru](mailto:ig_popov@mail.ru). Область научных интересов: исследования процессов холодной штамповки.

**Севериненко Антон Юрьевич**, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: [antonsever@yandex.ru](mailto:antonsever@yandex.ru). Область научных интересов: проектирование штампов для холодной штамповки, исследования процесса формообразования тройников.

**Петров Юрий Олегович**, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Dyran3604@yandex.ru](mailto:Dyran3604@yandex.ru). Область научных интересов: исследования технологий изготовления тройников.

## COMPUTER SIMULATION OF FORMING THIN-WALLED T-TEES

© 2014 I. P. Popov, A. Yu. Severinenko, Yu. O. Petrof

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper presents a new method of forming thin-walled t-tees. A finite-element software product ANSYS/LS-DYNA is applied to analyze the quality of the t-tees produced and to compare them with those obtained by flanging. The variation in thickness of t-tees is analyzed and the efficiency of the forming method proposed is confirmed.

*Thin-walled t-tees, computer simulation, forming, ANSYS/LS-DYNA, flanging, variation in thickness.*

### References

1. Davidov O.Y., Egorov V.G., Nevstruev Y.A. Forming of unequal tees from tubular billet in split dies // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2005. №6. P. 40-44. (In Russ.)
2. Forming of standard elements of pipeline systems using multipurpose hydraulic presses. Technologic recommendations / Kharkov branch office of NIAT. – Kharkov: 1985.

3. Titov R.S., Gilimzyanov Sh.N., Antropov V.V., Maslov V.D., Popov I.P. Ustroystvo dlya formoobrazovaniya troynikov [Devices for tees forming]. Patent of the Russian Federation, no. 67487, 2007. (Published 27.10.2007, bulletin no. 30).

4. Severenko A.Yu., Petrov Yu.O., Maslov V.D., Grechnikov F.V. Ustroystvo dlya formoobrazovaniya polykh troynikov [Devices for hollow tees forming]. Patent of the Russian Federation, no. 119655, 2012. (Published 27.08.2012, bulletin no. 24).

#### **About the authors**

**Popov Igor Petrovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Plastic Metal Working, Samara State Aerospace University. E-mail: [ig\\_popov@mail.ru](mailto:ig_popov@mail.ru). Area of research: cold forming processes.

**Severinenko Anton Yurevich**, post-graduate student, Department of Plastic Metal Working, Samara State Aerospace Univer-

sity. E-mail: [antonsever@yandex.ru](mailto:antonsever@yandex.ru). Area of research: design of cold-stamping dies, research of forming t-tees.

**Petrov Yuri Olegovich**, post-graduate student, Department of Plastic Metal Working, Samara State Aerospace University. E-mail: [Dyran3604@yandex.ru](mailto:Dyran3604@yandex.ru). Area of research: techniques of t-tees manufacturing.