### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ЧЕРЕЗ ВРАЩАЕМУЮ ВОЛОКУ

© 2009 Я.А. Ерисов, В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко

Самарский государственный аэрокосмический университет

#### Поступила в редакцию 11.06.2008

Приведены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния в процессе безоправочного волочения тонкостенных труб с вращением волоки с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе ANSYS/LS-DYNA. Ключевые слова: компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, процесс безоправочного волочения тонкостенных труб, метод конечных элементов

Тонкостенные трубы, изготавливаемые безоправочным волочением, обладают высоким качеством с точки зрения точности геометрических размеров, чистоты поверхности и механических свойств. Однако рост потребности в холоднотянутых трубах обуславливает необходимость совершенствования способов их производства.

В процессе безоправочного волочения значительная часть усилия уходит на преодоление внешнего трения трубной заготовки о рабочие стенки волоки. Уменьшить силы трения можно за счет приложения вращательного движения волоки в плоскости, перпендикулярной оси канала [1-4]. При таком движении контактная поверхность волоки перемещается относительно трубной заготовки по винтовой линии со скоростью в точке  $A V_{pA}$  (рис. 1), её составляющие:

$$V_{\kappa A} = \omega r_A = 2\pi n r_A ,$$
  
$$V_{\kappa A} = V_{\kappa} \frac{F_{\kappa}}{F_A} ,$$

где *w*- угловая скорость вращения волоки;

 $r_{A}$  – расстояние точки A от оси вращения;

 $\ddot{n}$  – число оборотов волоки в минуту;

вращения;

*V*<sub>ед</sub> – скорость перемещения в направлении волочения;

*F*<sub>*A</sub></sub> – площадь поперечного сечения трубы,</sub>* проходящей через точку А;

F<sub>r</sub> – площадь поперечного сечения готовой трубы.

Ерисов Ярослав Александрович, студент.

E-mail: erisov@samaradom.ru.

E-mail: tpast@newmail.ru.

Положение результирующего вектора скорости  $V_{n^{A}}$  определяется углом

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{V_{o\kappa A}}{V_{o\kappa A}}.$$

В направлении, противоположном V<sub>pA</sub> действует напряжение трения  $\tau_{A}$ , проекции которого равны  $\tau_4 \cos\beta$  и  $\tau_4 \sin\beta$ . Значение  $\tau_4$  определяется по закону Кулона:

$$\tau_A = f p_A \sin \alpha$$
,

гдеf – коэффициент трения;

 $p_{_{A}}$  – давление в канале волоки;

 $\alpha$  – угол конуса рабочей зоны волоки.

При вращении волоки крутящим моментом М<sub>а</sub> на контактной поверхности возникает реактивный момент трения  $M_{_{mp}}$ , который передается трубе в очаге пластической деформации (ОПД). Таким образом, протягиваемая труба нагружается помимо усилия волочения Р<sub>а</sub> крутящим моментом, равным моменту от сил трения.

Рассматриваемый способ волочения при безоправочном волочении мало изучен. В частности, нет данных о напряженно деформированном состоянии. Это затрудняет его использование на производстве.

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование безоправочного волочения тонкостенных труб через вращаемую волоку с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе ANSYS/LS-DYNA [5].

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

$$\sigma_i = \sigma_{0,2} + E' \mathbf{e}_i$$

где  $\sigma_i$  – напряжение течения;

 $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;

е, – накопленная интенсивность деформаций;

Каргин Владимир Родионович, доктор технических наук, npopeccop. E-mail: vrkargin@mail.ru.

Пастушенко Татьяна Сергеевна, ассистент.



Рис. 1. Напряжения трения и скорости движения в канале вращающейся волоки

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

 $\sigma_{
m 
m {\tiny B}}$  – предел прочности;

$$\delta$$
 – относительное удлинение;

Е – модуль упругости.

Материал волоки сталь X12M $\Phi$  (*E* = 210 ГПа, *n* = 0,3) моделировали жестким.

Для построения трехмерной упорядоченной сетки конечных элементов выбрали оболочечные элементы. Конечно-элементная сетка трубы была сгенерированна с использованием 1920 элементов (длина ребра элемента 1 мм), волоки – 1936 элементов (0,5 мм) (рис. 2).

Компьютерное моделирование безоправочного волочения тонкостенной трубы О10 мм из заготовки О13х1 мм из алюминиевого сплава Д16 ( $y_{0,2} = 320$  МПа;  $y_e = 450$  МПа; E = 72 ГПа;  $n = 0,34; \partial = 0,25$ ) проводили в конические волоки с параметрами: угол конуса рабочей зоны – 12?; калибрующий поясок – 2,5 мм; радиус сопряже-

ния обжимной и калибрующей зон – 5 мм. В расчетах принято f = 0,09;  $V_s = 15$  м/мин; n = 1500 об/мин. Устойчивость процесса волочения обеспечивалась при длине трубы не менее 50 мм.

На установившейся стадии волочения через неподвижную и вращаемую волоку получено распределение компонент напряжений и деформаций в продольном сечении ОПД, показанное на рис. 3 и 4.

Из анализа графиков (рис. 3, а) следует, что осевые растягивающие напряжения  $\sigma_z$ , как следовало ожидать, возрастают к выходу из ОПД. Вращение волоки приводит к их снижению на 28%. Контактное давление *p* распределено в канале волоки неравномерно и имеет два экстремума на входе и выходе из ОПД. Причем пик давления на выходе из ОПД в 2,8 раза больше, чем на входе в ОПД. Величина тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta}$  по абсолютной величине при вращении волоки уменьшается, а *p* увеличивается.

Приложение вращательного движения к волоке приводит к увеличению радиальных дефор-



Рис. 2. Конечно-элементная сетка трубы и волоки



Рис. 3. Распределение компонент нормальных (а) и касательных (б) напряжений в продольном сечении ОПД: ——вращаемая волока; — — – неподвижная волока

маций  $e_{\rho}$  на 20% (рис. 4, а), т.е. к более интенсивному утолщению стенки, что уменьшает длину протянутой трубы. При более высоких скоростях волочения с увеличением числа оборотов волоки толщина стенки растет менее интенсивно (рис. 5). Распределение тангенциальных  $e_{\rho}$  и осевых  $e_{z}$  деформаций в продольном сечении ОПД вращаемой волоки отличается незначительно по сравнению с деформациями при волочении через неподвижную волоку.

В процессе волочения сдвиговые напряжения и деформации являются основным механизмом пластического формоизменения. Вращение волоки приводит к интенсификации сдвиговых напряжений и деформаций, что может оказать существенное влияние на формирование структуры и свойств готовых труб.

В поперечных сечениях ОПД по мере продвижения металла трубы вдоль канала вращаемой волоки касательные напряжения  $\tau_{\theta z}$  и угловые деформации  $\gamma_{\theta z}$  приводят к осевому закручиванию трубы. Их величина нарастает от входа в ОПД, достигая своего максимального значения на выходе из ОПД. Установлено изменение схемы напряженного состояния с осесимметричной на объемную, что усложняет картину напряженно-деформированного состояния из-за наложения скручивающих сил и изменения условий на контактной поверхности "волока – заготовка".

Получена зависимость усилия волочения  $P_{a}$  от числа оборотов волоки *n* при различных скоростях волочения  $V_{a}$  (рис. 5). При более высоких скоростях волочения для заметного снижения усилия необходимо вращать волоку с большим числом оборотов, что объясняется схемой сил, действующих в точке *A* контактной поверхности вращающейся волоки (рис. 1). Уменьшение сил трения, действующих в направлении, обратном волочению, тем значительнее, чем больше угол  $\beta$ .

Применение волочения через вращаемую волоку целесообразно при изготовлении тонкостенных труб большого диаметра, при моделировании которых установлено заметное уменьшение усилия с ростом числа оборотов волоки (рис. 5).



**Рис. 4.** Распределение линейных (а) и угловых (б) деформаций в продольном сечении ОПД: — вращаемая волока; — — – неподвижная волока



Таким образом, результаты компьютерного моделирования наглядно показывают особенности влияния кручения волоки в плоскости, перпендикулярной оси волочения, на изменение напряженно-деформированного состояния при безоправочном волочении тонкостенных труб.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перлин И.Л., Ерманок М.З.* Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971, 448 с.

- 2. *Савин Г.А.* Волочение труб. М.: Металлургия, 1993, 336 с.
- 3. *Тарнавский А.П.* Эффективность волочения с противонатяжением. М.: Металлургиздат, 1959, 152 с.
- Шевченко А.А., Сизоненко Г.А., Рогов М.В. Об особенностях процесса волочения с вращением контактных поверхностей инструмент-заготовка/ Производство труб. – М.: Металлургия, 1971. Вып. №26. С. 108-114.
- 5. *Дубинский С.* Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0 / САПР и графика. 2004. №3. С. 34-38.

## COMPUTER SIMULATION OF THIN-WALLED TUBE SINKING WITH ROTATIONAL MOVEMENT OF DRAWING DIE

© 2009 Ya.A. Erisov, V.R. Kargin, T.S. Pastushenko

#### Samara State Aerospace University

In this work, the cold sinking (plugless drawing) of thin-walled tubes with rotational movement of drawing die was simulated by finite element method (FEM) with the particularized bundled software ANSYS/LS-DYNA to determine mode of deformation and parameters of process.

Key words: computer simulation, stress and deformation, thin-walled tube sinking, final-element model.

Yaroslav Erisov, Student. E-mail: erisov@samaradom.ru. Vladimir Kargin, Doctor of Technics, Professor. E-mail: vrkargin@mail.ru. Tatyana Pastushenko, Assistant Lecturer. E-mail: tpast@newmail.ru.