

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, Я.А. Ерисов  
Самарский государственный аэрокосмический университет

Тонкостенные трубы с высоким качеством поверхности и заданными размерами изготавливают безоправочным волочением [1,2]. Однако проектирование технологического процесса традиционными методами становится нерациональным с точки зрения времени и стоимости.

За последние годы активное развитие информационных технологий сделало возможным применение математического моделирования при определении напряженно-деформированного состояния и механических свойств труб, а также при оптимизации конструкции инструмента [3,4].

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование процесса безоправочного волочения тонкостенных труб с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе [DEFORM-2D](#) [5]. Числовой расчет волочения труб  $\varnothing 10 \times 1$  мм из алюминиевого сплава Д16М проводили в конические упругие волокни из стали Х12М с параметрами: входная зона  $36^\circ$ , выходная зона  $60^\circ$ , калибрующий поясик 5 мм. В расчетах варьировали углом обжимной зоны  $\alpha$  ( $7^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ) и радиусом сопряжения обжимной и калибрующей зон  $R$  (0, 5, 15, 25, 35, 45 мм), рис. 1.

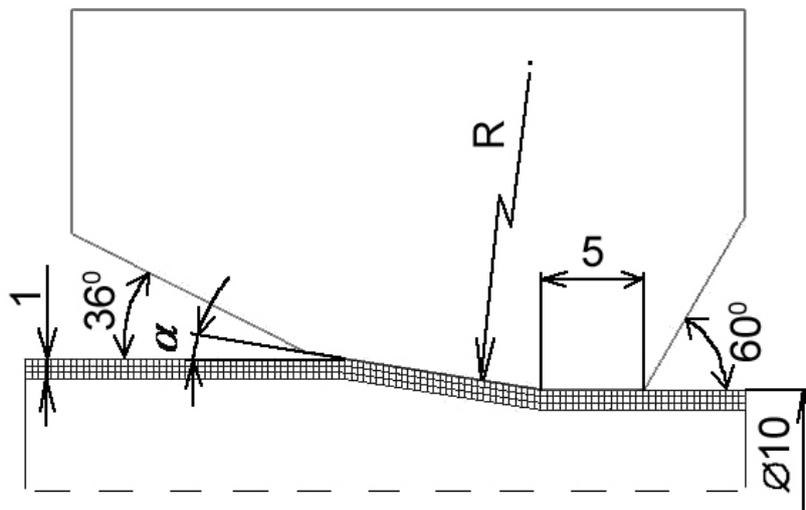


Рис. 1. Конечно-элементная сетка и геометрия волокни

Для описания материала трубы принята модель упрочняющейся упруго-пластической среды. Механические свойства материала трубы заданы значениями модуля упругости  $E=71$  ГПа, коэффициента Пуассона  $\nu=0,33$ , предела текучести в зависимости от накопленной интенсивности пластических деформаций.

При волочении деформация трубы принималась как осесимметричная. На поверхности контакта трубы с волокон действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона, коэффициент трения принят равным 0,09.

Двухмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 1000 элементов (рис. 1), что составило 3 конечных элемента по толщине стенки трубы. Перемещение трубы в канале волокон на каждом шаге расчета равно 0,1 мм.

Устойчивость процесса волочения обеспечивалась при длине не менее 100 мм. На рис. 2 изображен график усилия волочения от перемещения трубы при скорости волочения 100 мм/с ( $\alpha=12^\circ$ , коэффициент вытяжки  $\mu=1,33$ ). Из рис. 2 видно, что кривая состоит из трех участков. Первый участок (120 шагов) характеризуется ростом усилия волочения при входе трубы в канал волокон. На втором участке (1060 шагов) усилие не изменяется, что говорит об установившемся процессе. На конечной стадии (70 шагов) усилие волочения убывает при выходе трубы из канала волокон.

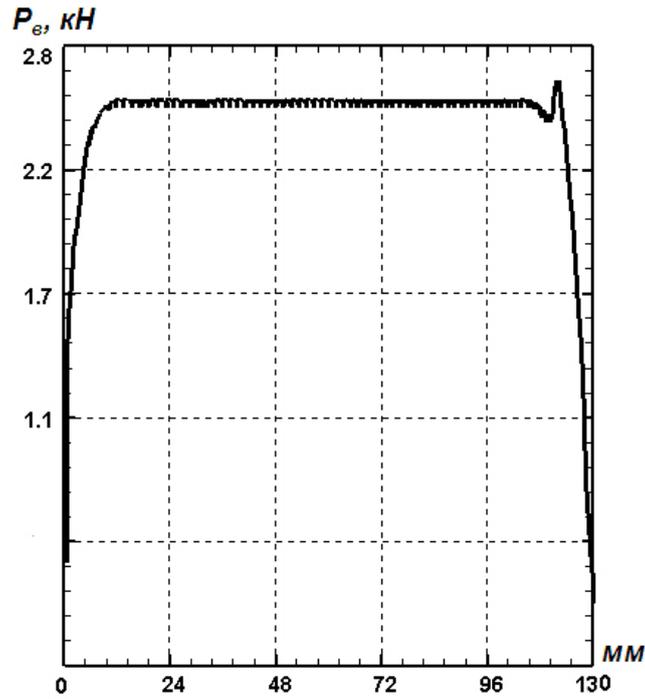


Рис. 2. Зависимость "усилие волочения – перемещение трубы"

Чтобы оценить точность компьютерной модели процесса, проведено сравнение результатов численного расчета усилия волочения  $P_e$  при коэффициентах вытяжки  $\mu=1,22$  и  $\mu=1,33$  с теоретическим решением И.Л. Перлина [1,2], получившим широкое применение в инженерной практике:

$$P_e = \left\{ 1,15 S_{Tc} \frac{a_2 + 1}{a_2} \left[ 1 - \left( \frac{D_{Ck}}{D_{Cn}} \right)^{a_2} \right] + \sigma_{lyn} \left( \frac{D_{Ck}}{D_{Cn}} \right)^{a_2} \right\} F_k, \quad (1)$$

где  $D_{Cn}$  и  $D_{Ck}$  – средний диаметр трубы до и после волочения;

$S_{Tc}$  – среднее значение сопротивления пластической деформации материала трубы в обжимной зоне;

$\sigma_{lyn}$  – напряжение на границе упругой и пластической зон при входе трубы в канал волоки;

$F_k$  – площадь поперечного сечения трубы на выходе из волоки;

$$a_2 = \frac{1 + f_n \operatorname{ctg} \alpha_n}{1 - f_n \operatorname{tg} \alpha_n} - 1;$$

$f_n$  – коэффициент трения;

$\alpha_n$  – приведенный угол;

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{(D_n - D_k) \operatorname{tg} \alpha}{(D_n - D_k) + 2l_k \operatorname{tg} \alpha};$$

$D_n$  и  $D_k$  – наружный диаметр трубы до и после волочения;

$l_k$  – длина калибрующего пояска.

Из рис. 3 следует, что формула (1) справедлива только при  $\alpha < 15^\circ$ , так как не учитывает работу на осуществление сдвигов на выходе из волоки. Величины усилий волочения отличаются друг от друга не более чем на 25%, что свидетельствует о достаточной точности компьютерного моделирования.

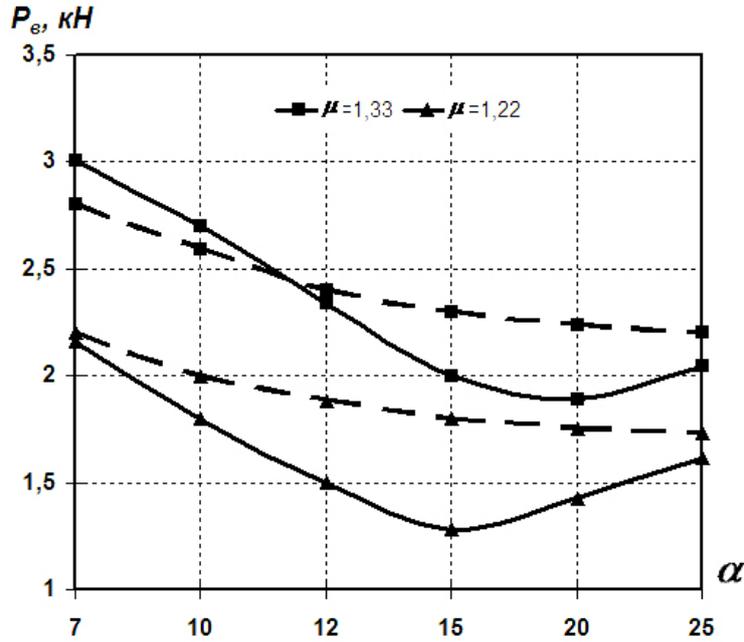


Рис. 3. Зависимость усилия волочения  $P_d$  от угла волоки  $\alpha$   
 (— метод конечных элементов; - - - теоретическое решение И.Л. Перлина)

Решение задачи методом конечных элементов на участке установившегося процесса волочения позволяет получить распределение напряжений в продольном и поперечных сечениях очага пластической деформации. Расчеты показывают, что распределение напряжений по толщине стенки отличается значительной неравномерностью. Из рис. 4 видно, что в середине очага пластической деформации радиальные сжимающие напряжения на внутренней поверхности трубы близки к нулю, а на наружной поверхности определяют величину давления на канал волоки. Наличие радиальных сжимающих напряжений по толщине стенки указывает на объемную схему напряженного состояния. В теоретических исследованиях  $\sigma_r$  чаще всего пренебрегали [1,2]. Осевые напряжения  $\sigma_z$  из сжимающих на внутренней поверхности переходят в растягивающие на наружной. Тангенциальные сжимающие напряжения  $\sigma_\theta$  достигают наибольших значений на наружной стенке трубы.

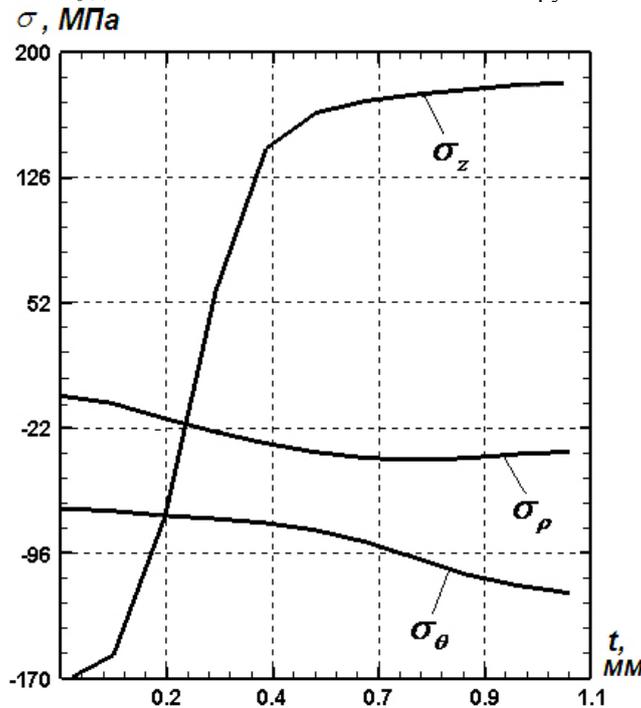


Рис. 4. Распределение напряжений по толщине стенки

На рис. 5 изображено распределение интенсивности напряжений в продольном сечении очага пластической деформации. Из рис. 5 видно, что более интенсивно подвергаются деформации наружные слои трубы из-за влияния сил трения на границе "труба – волока".

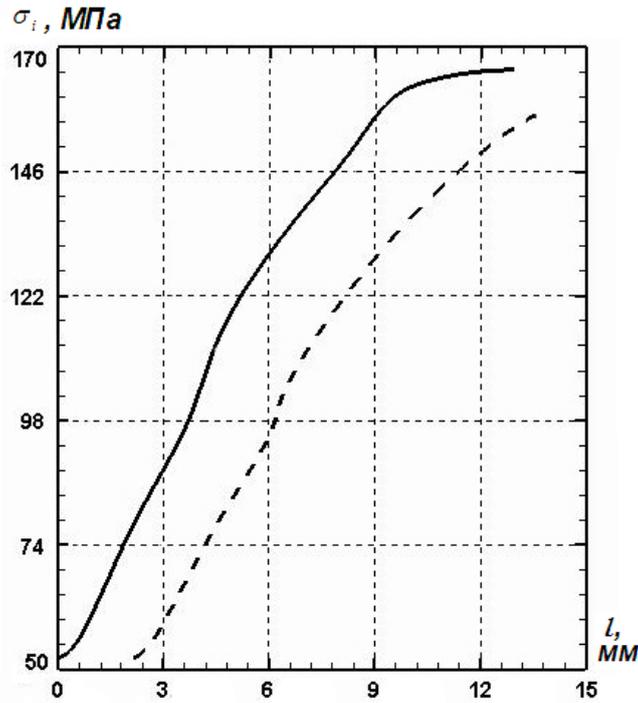


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений в продольном сечении очага пластической деформации (— — наружная поверхность трубы; - - - внутренняя поверхность трубы)

В работе [6] в качестве основного требования к зависимостям для расчета силовых условий процесса волочения отмечено, что "формула должна показывать наличие зоны оптимальных углов, обеспечивающих минимальное усилие волочения". По результатам моделирования такая зона установлена, рис. 3. При коэффициенте вытяжки  $\mu=1,22$  зона оптимальных углов  $12^\circ-20^\circ$ , при  $\mu=1,33$  –  $15^\circ-25^\circ$ , что хорошо согласуется с результатами экспериментов [1]. При увеличении коэффициента вытяжки значение оптимального угла смещается вправо.

Числовые расчеты позволили найти зону оптимальных радиусов сопряжения обжимного и калибрующего участков. При угле конуса волокна  $\alpha=12^\circ$  для коэффициента вытяжки  $\mu=1,22$  оптимальный радиус  $R=8$  мм, при  $\mu=1,33$  –  $R=5$  мм, рис. 6.

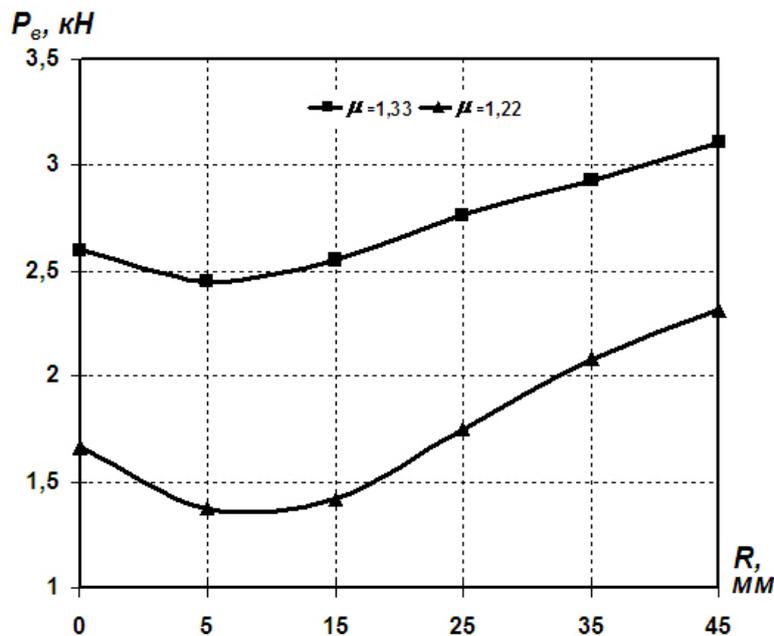


Рис. 6. Зависимость усилия волочения  $P_e$  от радиуса  $R$

Применение волокна оптимальной конструкции (рис. 7) позволяет увеличить коэффициент запаса прочности, характеризующий безобрывность волочения [1,2]:

$$K_3 = \frac{\sigma_m^K F_K}{P_6} \geq 1,2,$$

где  $\sigma_m^K$  – предел текучести материала трубы на выходе из волоки.

Для волоки ( $\alpha=9^\circ$ ,  $R=50$  мм), используемой на производстве при волочении труб  $\varnothing 10 \times 1$  мм из алюминиевого сплава Д16М с коэффициентом вытяжки  $\mu=1,33$  –  $P_6 = 3,35$  кН,  $K_3 = 1,3$ . Для волоки оптимальной геометрии на рис. 7 для данного процесса усилие волочения снижается до  $P_6 = 2,55$  кН, а коэффициент запаса увеличивается  $K_3 = 1,8$ .

Использование волоки оптимальной конструкции позволяет увеличить максимальную допустимую вытяжку за проход  $\mu_{max}$  с 1,34 ( $\alpha=9^\circ$ ,  $R=50$  мм) до 1,43.

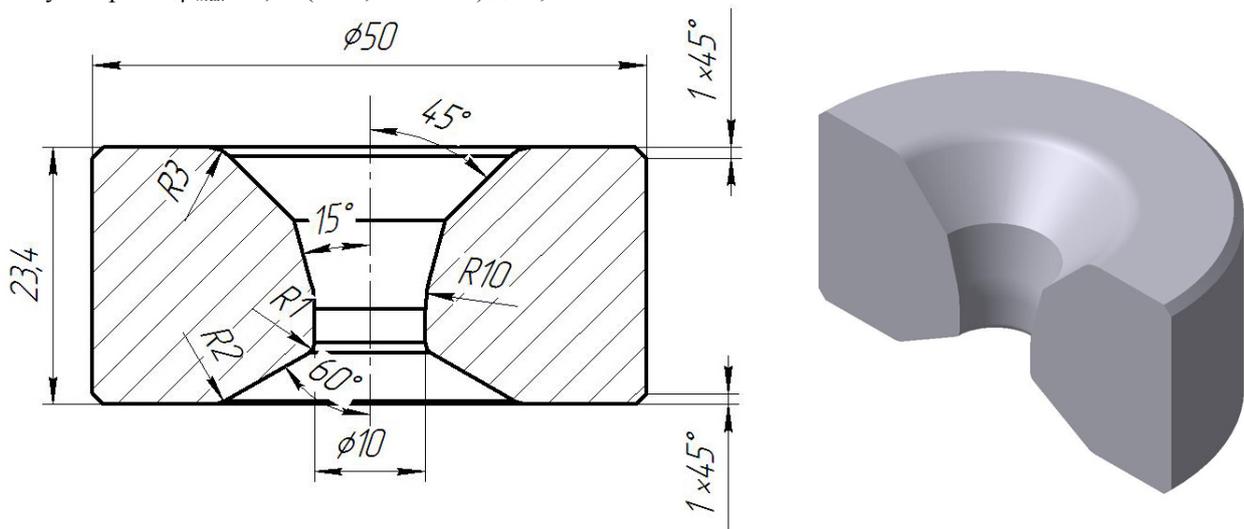


Рис. 7. Предлагаемая конструкция волоки

Таким образом, компьютерное моделирование безправочного волочения тонкостенных труб позволяет усовершенствовать и спроектировать устойчивый и экономичный с точки зрения энергозатрат инструмент и процесс, уменьшая время освоения новой продукции.

#### Библиографический список

1. Перлин, И.Л. Теория волочения /И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Metallurgy, 1971. - 448 с.
2. Савин, Г.А. Волочение труб – М.: Metallurgy, 1993. - 336 с.
3. Каргин, В.Р. Безправочное волочение тонкостенных анизотропных труб [Текст]/В.Р. Каргин, Ю.С. Горшков//Известия вузов/Черная металлургия. - 1993. - №5. - С. 49-52.
4. Karnezis, P.E. Study of cold tube drawing by finite-element method [Текст]/P.E. Karnezis, D.C.J. Farrugia//J. Mat. Proc. Tech. - 1998. - вып. 80. - С. 690-694.
5. Харламов, А.А. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM [Текст]/А.А. Харламов, А.П. Латаев//САПР и графика. - 2005. - №5. - С. 24-29.
6. Ерманок, М.З. Зона оптимальных углов при аналитическом определении напряжения волочения [Текст]/М.З. Ерманок, В.М. Сигов//Цветные металлы. - 1991. - №3. - С. 36-38.

#### Информация об авторах

Каргин Владимир Родионович, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением, СГАУ, [vkargin@mail.ru](mailto:vkargin@mail.ru), разработка процессов производства профилей и труб.

Каргин Борис Владимирович, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением, СГАУ, [bkargin@mail.ru](mailto:bkargin@mail.ru), технология прокатно-прессового производства.

Ерисов Ярослав Александрович, инженер, СГАУ, [erisov@samaradom.ru](mailto:erisov@samaradom.ru), компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением.

#### COMPUTER SIMULATION OF SINKING OF LIGHT-WALL TUBING

© 2008 V.R. Kargin, B.V. Kargin, T.S. Pastushenko, Ya.A. Erisov

Samara state aerospace university

In this work, the cold sinking (plugless drawing) of thin-walled tubes was simulated by finite element method (FEM) with the particularized bundled software DEFORM-2D to find the best geometry of die to reduce the drawing force.

*Mathematical simulation, mode of deformation, light-wall tubing, sinking, draw force, reduction ratio, finite element method.*

#### Bibliography

1. Perlin, I.L. Theory of drawing [Text]/I.L. Perlin, M.Z. Ermanok. – M.: Metallurgy, 1971. - 448 p.
2. Savin, G.A. Tube-drawing [Text]/G.A. Savin. – M.: Metallurgy, 1993. - 336 p.
3. Kargin, V.R. Sinking of light-wall anisotropic tubing [Text]/V.R. Kargin, U.S. Gorshkov//Proceedings of Universities/Ferrous metallurgy. - 1993. - №5. - P. 49-52.
4. Karnezis, P.E. Study of cold tube drawing by finite-element method [Text]/P.E. Karnezis, D.C.J. Farrugia//J. Mat. Proc. Tech. - 1998. - vol. 80. - P. 690-694.
5. Harlamov, A.A. Metal forming simulation with bundled software DEFORM [Text]/A.A. Harlamov, A.P. Laetaev//CAD&Graphic. - 2005. - №5. - P. 24-29.
6. Ermanok, M.Z. Analytic definition of draw stress considering optimum angle zone [Text]/M.Z. Ermanok, V.M. Sigov//Non-ferrous metals. - 1991. - №3. - P. 36-38.

#### Information about authors

Kargin Vladimir Rodionovich, Sc.D., professor of metal forming department, SSAU, vrkargin@mail.ru, development of section's and tubing's production processes.

Kargin Boris Vladimirovich, candidate of science, lecturer of metal forming department, SSAU, bkargin@mail.ru, rolling and extrusion technology.

Erisov Yaroslav Aleksandrovich, erisov@samaradom.ru, computer simulation of metal forming processes.