

УДК 621.774.37+004.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

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

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приведены результаты компьютерного моделирования процесса безоправочного волочения тонкостенных труб в конические волокни с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе DEFORM-2D.

Математическое моделирование, напряжённо-деформированное состояние, тонкостенные трубы, безоправочное волочение, усилие, коэффициент вытяжки, метод конечных элементов.

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° , выходная зона 60° , калибрующий поясик 5 мм. В расчётах варьировали углом обжимной зоны α (7° , 10° , 12° , 15° , 20° , 25°) и радиусом сопряжения обжимной и калибрующей зон R (0, 5, 15, 25, 35, 45 мм) (рис. 1).

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.

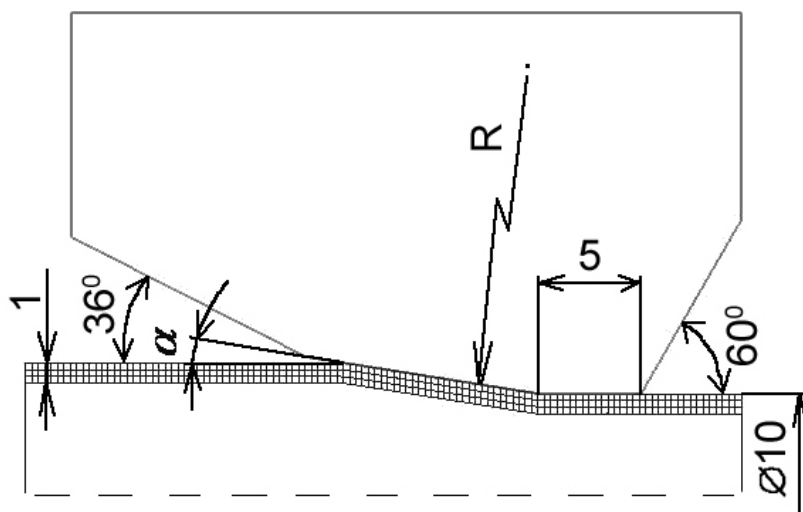


Рис. 1. Конечно-элементная сетка и геометрия волокни

При волочении деформация трубы принималась как осесимметричная. На поверхности контакта трубы с волокой 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 волоки 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 трёх участков. Первый участок (120 шагов) характеризуется ростом усилия волочения при входе трубы в канал волоки. На втором участке (1060 шагов) усилие не изменяется, что говорит об установившемся процессе. На конечной стадии (70 шагов) уси-

лие волочения убывает при выходе трубы из канала волоки.

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

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

где D_{Ch} и D_{Ck} – средний диаметр трубы до и после волочения; S_{Tc} – среднее значение сопротивления пластической деформации материала трубы в обжимной зоне; σ_{lyn} – напряжение на границе упругой и пластической зон при входе трубы в канал волоки; F_k – площадь поперечного сечения трубы на выходе из волоки;

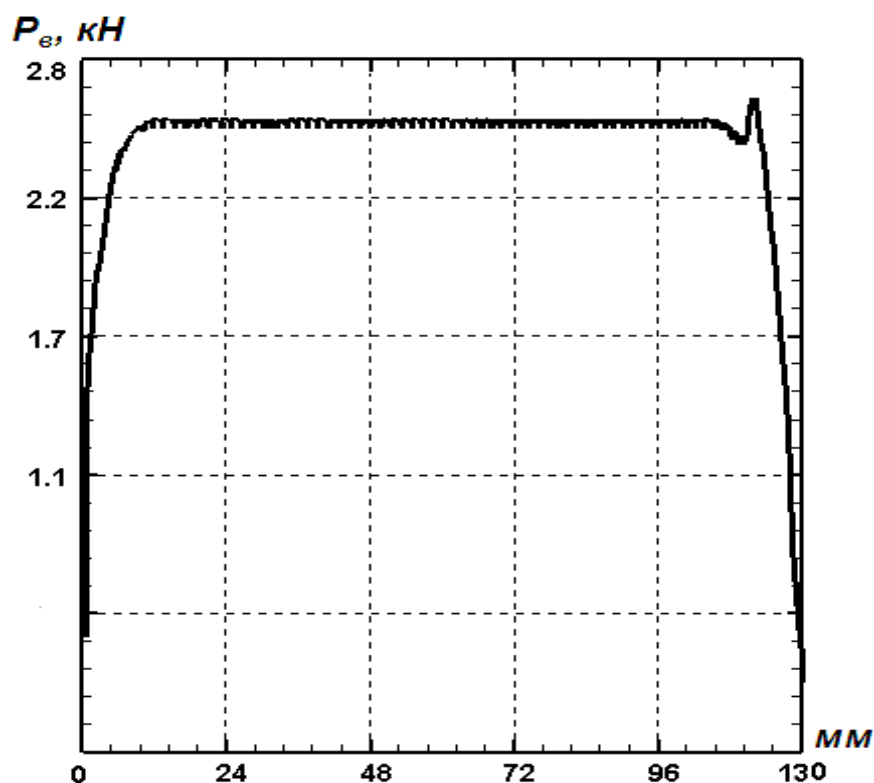


Рис. 2. Зависимость “усилие волочения – перемещение трубы”

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

f_n – коэффициент трения; α_n – приведённый 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 пояса.

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 сходимости результатов компьютерного моделирования.

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 σ_r чаще всего пренебрегали [1, 2]. Осевые напряжения σ_z из сжимающих на внутренней поверхности переходят в растягивающие на наружной. Тангенциальные сжимающие напряжения σ_θ достигают наибольших значений на наружной стенке трубы.

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”.

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 ми-

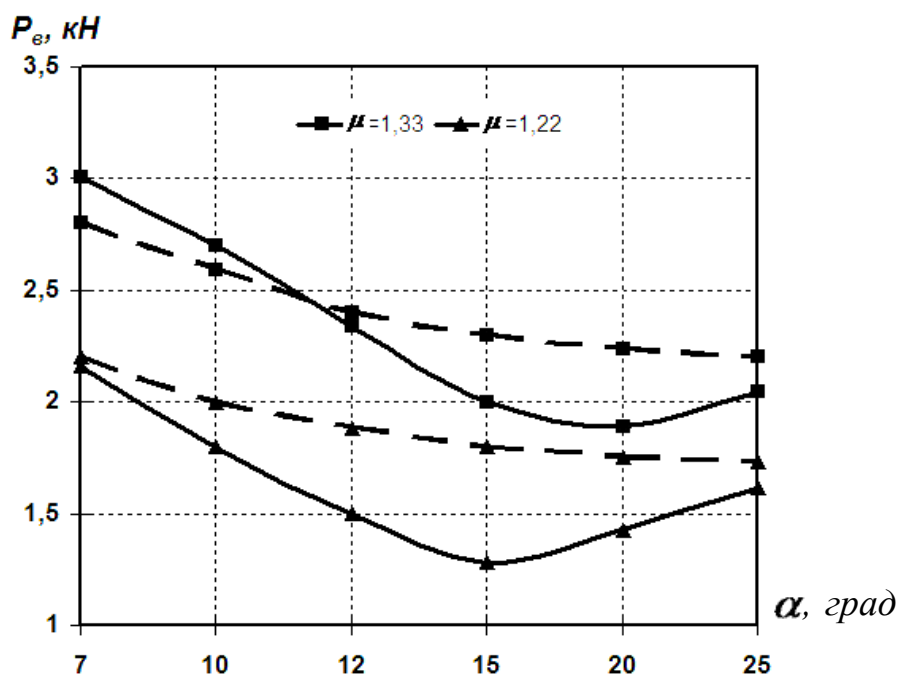


Рис. 3. Зависимость усилия волочения P_v от угла волоки α
(— метод конечных элементов; - - - теоретическое решение И. Л. Перлина)

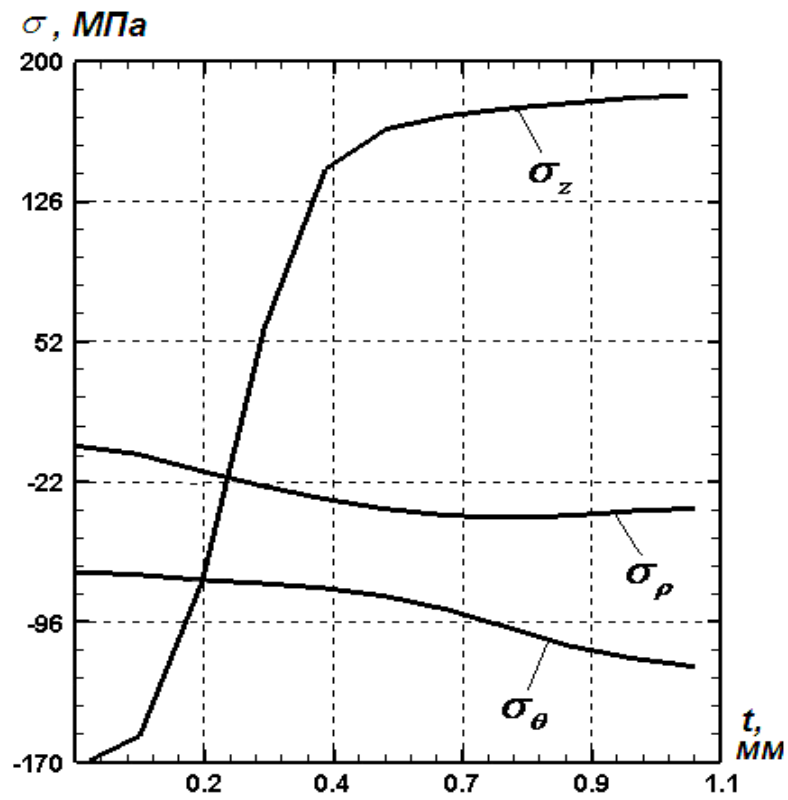


Рис. 4. Распределение напряжений по толщине стенки

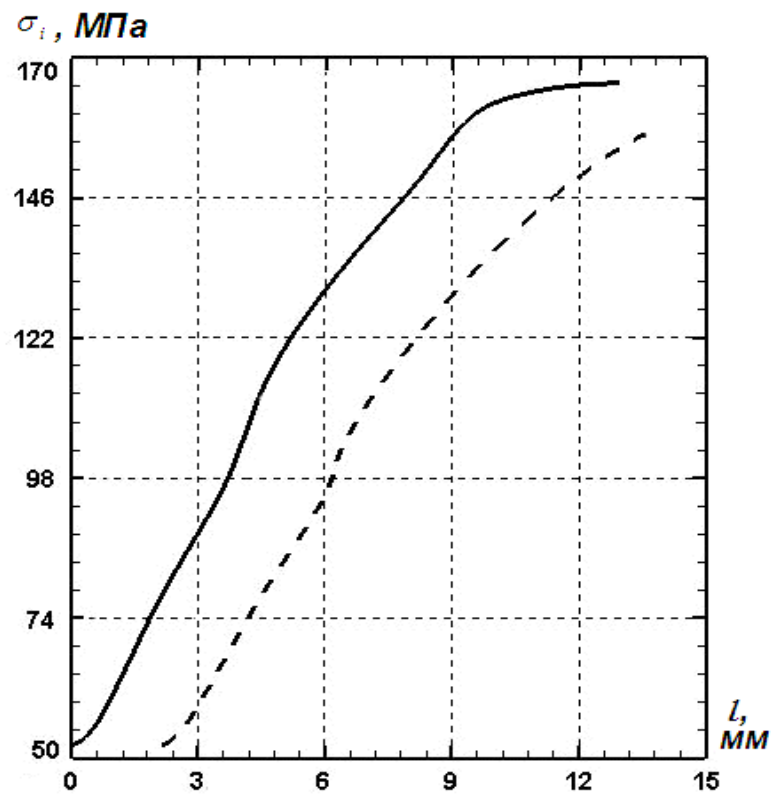


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений в продольном сечении очага пластической деформации
(— наружная поверхность трубы; - - - - - внутренняя поверхность трубы)

нимальное усилие волочения”. По результатам моделирования такая зона установлена (рис. 3). При коэффициенте вытяжки $\mu=1,22$ зона оптимальных углов 12° - 20° , при $\mu=1,33$ – 15° - 25° , 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).

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

$$K_3 = \frac{\sigma_m^k F_k}{P_6} \geq 1,2,$$

где σ_m^k – предел текучести материала трубы

на выходе из волокна.

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

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

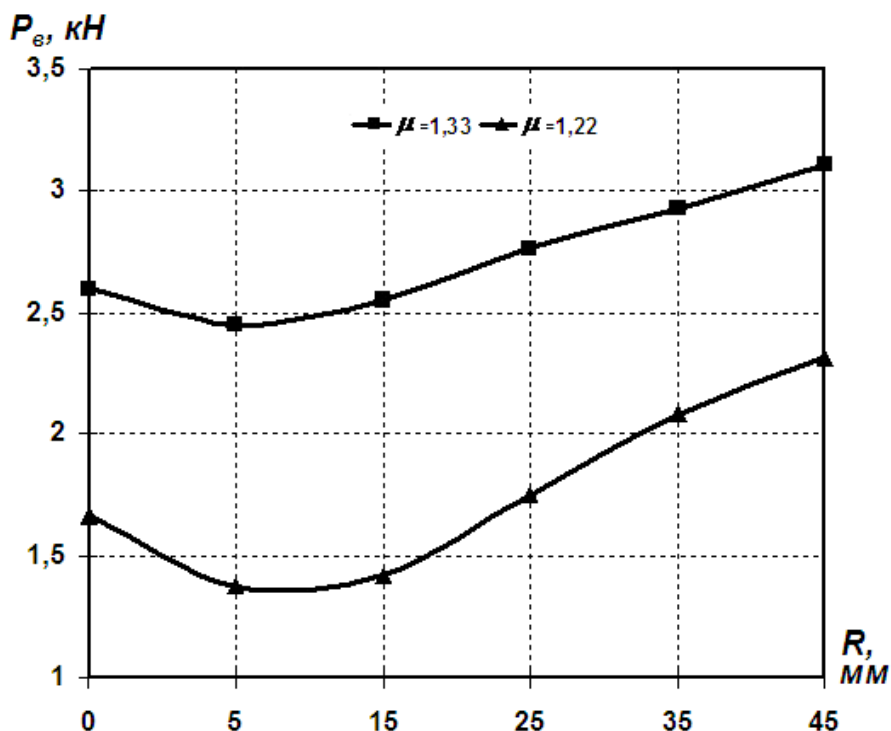


Рис. 6. Зависимость усилия волочения P_6 от радиуса R

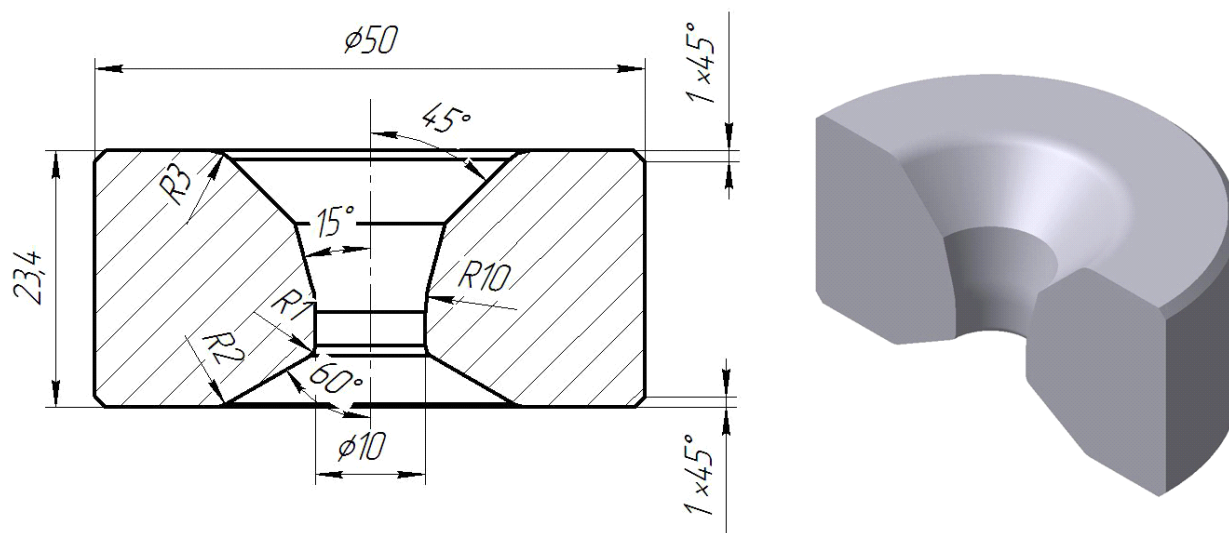


Рис. 7. Предлагаемая конструкция волокна

Библиографический список

1. Перлин, И. Л. Теория волочения [Текст]/И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Савин, Г. А. Волочение труб [Текст]/Г. А. Савин. – М.: Металлургия, 1993. – 336 с.
3. Каргин, В. Р. Безоправочное 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.

References

1. Perlin, I. L. Theory of drawing /I. L. Perlin, M. Z. Yermanok. – Moscow: Metallurgiya, 1971. – 448 pp.
2. Savin, G. A. Tube drawing /G. A. Savin. – Moscow: Metallurgiya, 1993. – 336 pp.
3. Kargin, V. R. Sink drawing of thin-walled anisotropic tubes /V. R. Kargin, Yu. S. Gorshkov // Izvestiya vuzov / Tchyornaya metallurgiya (Ferrous metallurgy). – 1993. – No. 5. – pp. 49-52.
4. Karnezis, P. E. Study of cold tube drawing

by finite-element method /P. E. Karnezis, D.C.J. Farrugia // J. Mat. Proc. Tech. – 1998. – vol. 80. – pp. 690-694.

5. Kharlamov, A. A. Plastic metal working simulation with the help of DEFORM complex / A. A. Kharlamov, A. P. Latayev // CAD and graphics. – 2005. – No. 5 – pp. 24-29.

6. Yermanok, M. Z. Zone of optimal angles for analytical determination of drawing stress / M. Z. Yermanok, V. M. Sigov / Tsvetnye metally (Non-ferrous metals) – 1991. – No. 3. – pp. 36-38.

COMPUTER SIMULATION OF THIN-WALLED TUBE SINK DRAWING

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

Samara State Aerospace University

The paper presents the results of computer simulation of the process of thin-walled tube sink drawing into conic dies using the finite element method in a specialized software complex DEFORM-2D.

Mathematical modeling, stress-strained state, thin-walled tubes, sink drawing, force, drawing coefficient, finite element method.

Информация об авторах

Каргин Владимир Родионович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет; e-mail: vrkargin@mail.ru. Область научных интересов: разработка процессов производства профилей и труб.

Каргин Борис Владимирович, кандидат технических наук, ассистент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет; e-mail: bkargin@mail.ru. Область научных интересов: технология прокатно-прессового производства.

Пастушенко Татьяна Сергеевна, ассистент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет, e-mail: tpast@newmail.ru. Область научных интересов: безоправочное волочение тонкостенных труб.

Ерисов Ярослав Александрович, студент группы 464, Самарский государственный аэрокосмический университет; e-mail: erisov@samaradom.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением.

Kargin Vladimir Rodionovitch, doctor of technical science, professor of the department of plastic metal working, Samara State Aerospace University, e-mail: vrkargin@mail.ru. Area of research: development of section and tube production processes.

Kargin Boris Vladimirovitch, candidate of technical science, assistant of the department of plastic metal working, Samara State Aerospace University, e-mail: bkargin@mail.ru. Area of research: technology of rolling and pressing production.

Pastushenko Tatiana Sergeevna, assistant of the department of plastic metal working, SSAU, e-mail: tpast@newmail.ru. Area of research: sink drawing of thin-walled tubes.

Yerisov Yaroslav Alexandrovitch, student, Samara State Aerospace University, e-mail: erisov@samaradom.ru. Area of research: computer simulation of plastic metal working processes.