

УДК 621.983.5

Профессор Е.Д. Чертов, доцент М.А. Васечкин,
доцент О.Ю. Давыдов, профессор В.Г. Егоров,
(Воронеж.гос. ун-т инж. технол.) кафедра технической механики.
тел.(473) 251-48-24
E-mail: vlad-niat@mail.ru

Professor E.D. Chertov, associate Professor M.A. Vasechkin,
associate Professor O.Iu. Davydov, professor V.G. Egorov,
(Voronezh state university of engineering technology) Department of technical mechanics.
phone (473) 251-48-24
E-mail: vlad-niat@mail.ru

Моделирование кинематики пластического течения при калибровке тонкостенной прецизионной трубы обжатием

Modeling of kinematics of a plastic shaping at calibration of a thin-walled precision pipe sinking

Реферат. Разработана математическая модель кинематики пластического течения при обжатии тонкостенной прецизионной трубы, применяемой для калибровки концов унифицированных элементов трубопровода летательных аппаратов из титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей перед сборкой в трассу посредством автоматической аргонодуговой сварки кольцевых стыков. Для моделирования применяется энергетический критерий устойчивости с использованием кинематически возможных полей скоростей для получения верхней оценки усилия деформирования. Разработанная модель кинематики пластического течения позволяет получить энергосиловые параметры основного состояния процесса калибровки обжатием и может быть использована для решения задачи об устойчивости процесса деформирования по результатам сопоставления энергетических (силовых) параметров для основного (устойчивого) и возмущенного состояний. Моделирование производится в цилиндрической системе координат путем сравнения вариантов кинематически возможных полей скоростей течения, удовлетворяющих условию несжимаемости и кинематическим краевым условиям. По результатам моделирования был выбран вариант разрывного поля скоростей, при котором уменьшение наружного радиуса R происходит только за счет увеличения толщины стенки трубы t . Для данного варианта величина давления обжатия имела наименьшее значение, следовательно выбранное поле скоростей наиболее близко к действительному. Установлено, что с увеличением шага подачи l при калибровке многосекторным инструментом требуемое давление обжатия q уменьшается. При одинаковом шаге подачи l трубу с меньшей относительной толщиной t/R необходимо калибровать меньшим давлением обжатия. С возрастанием предела текучести при сдвиге материала трубной заготовки давление обжатия q увеличивается.

Summary. The mathematical model of kinematics of a plastic shaping at the sinking of a thin-walled precision pipe applied to calibration of the ends of the unified elements of the pipeline of aircraft from titanic alloys and corrosion-resistant steel before assembly to the route by means of automatic argon-arc welding of ring joints is developed. For modeling, the power criterion of stability with use of kinematic possible fields of speeds is applied to receiving the top assessment of effort of deformation. The developed model of kinematics of a plastic current allows to receive power parameters of the main condition of process of calibration by sinking and can be used for the solution of a task on stability of process of deformation by results of comparison of power (power) parameters for the main (steady) and indignant states. Modeling is made in cylindrical system of coordinates by comparison of options of kinematic possible fields of the speeds of a current meeting a condition of incompressibility and kinematic regional conditions. The result of the modeling was selected discontinuous field of high-speed, in which the decrease outer radius (R) occurs only by increasing the thickness of the pipe wall (t). For this option the size of pressure of sinking had the smallest value, therefore the chosen field of speeds closely to the valid. It is established that with increase in a step of giving l at calibration by the multisector tool the demanded pressure of sinking of q decreases. At an identical step of giving l pipe with the smaller relative thickness of (t/r) needs to be calibrated the smaller pressure of sinking. With increase of a limit of fluidity at shift of material of pipe preparation pressure of sinking of (q) increases.

Ключевые слова: математическая модель, обжатие, давление, тонкостенная труба, устойчивость, поле скоростей.

Keywords: mathematical model, reduction, pressure, thin-wall pipe, stability, velocity field.

Элементы трубопровода летательных аппаратов из титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей подлежат калибровке перед сборкой в трассу трубопровода. Калибровка применяется для подготовки стыкуемых кромок с целью устранения несоответствия диаметров и овальности. При этом отклонения наружного диаметра калиброванного конца тонкостенных прецизионных труб под автоматическую сварку кольцевых стыков не должны превышать $\pm 0,15$ мм от номинального размера [1].

Сущность известного способа калибровки заключается в обжатии трубы многосекторной матрицей [2] (рисунок 1). Рабочее движение секторов матрицы - радиальное по направлению к оси трубы.

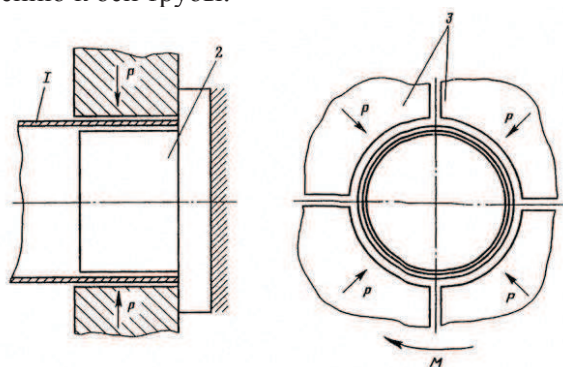


Рисунок 1. Схема калибровки многосекторной матрицей: 1 - труба калибруемая; 2 - оправка; 3 - секторы матрицы

В теоретическом плане процесс калибровки труб способом обжатия многосекторным инструментом активно изучается отечественными и зарубежными учеными. Так, в работе [3] произведен расчет силовых параметров при ротационном обжиме тонкостенных труб. Экспериментальное исследование устойчивости заготовки при обжиме проводилось в [4] на трубах из стали ШХ-15 с различными геометрическими параметрами. Поскольку устойчивость трубных заготовок зависит от соотношения их геометрических параметров, штамповой оснастки, условий интенсификации процесса обжима, то варьируемыми параметрами в опытах выбрана высота и толщина стенки трубы.

В то же время причины раннего гофрообразования (рисунок 2) при калибровке обжатием особотонкостенных труб многосекторным инструментом изучены недостаточно. В открытой печати отсутствуют сведения о продольной устойчивости тонкостенной прецизионной трубы в результате обжима ее концов многосекторным инструментом в процессе калибровки перед автоматической сваркой кольцевых стыков. Не выявлено влияние относительной толщины стенки трубы, ее диамет-

ра, величины обжатия, количества секторов разжимного инструмента и механических характеристик используемых сплавов на потерю устойчивости в продольном направлении.



Рисунок 2. Потеря устойчивости стенкой трубы при калибровке обжатием

Оценка устойчивости деформирования с использованием энергетического критерия устойчивости выполняется по результатам сопоставления энергетических (силовых) параметров для основного (устойчивого) и возмущенного состояний. Поэтому для решения задачи об устойчивости процесса деформирования необходимо иметь модель кинематики течения и энергосиловые параметры для основного состояния.

Для моделирования кинематики течения при обжатии трубы и определения необходимого давления обжатия используем метод верхней оценки. Согласно этому методу, любое кинематически возможное поле скоростей позволяет получить верхнюю оценку усилия деформирования. Для действительного поля скоростей верхняя оценка усилия достигает минимального (точного) значения. Схема калибровки обжатием края трубы и геометрические параметры процесса представлены на рисунке 3.

Для описания геометрии заготовки используем цилиндрическую систему координат r, θ, z . Границы изменения координат для деформируемой части заготовки определяются неравенствами:

$$R - t \leq r \leq R; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi; \quad 0 \leq z \leq l \quad (1)$$

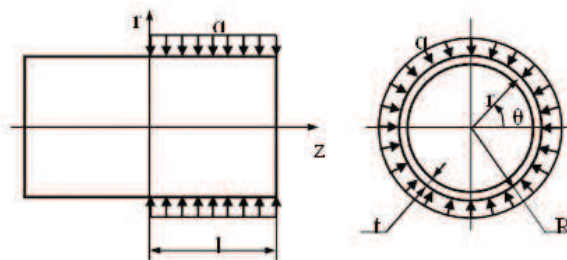


Рисунок 3. Схема и геометрические параметры калибровки

Поле скоростей, описывающее пластическое течение заготовки должно удовлетворять условию несжимаемости и кинематическим краевым условиям. Калибровка представляет собой осесимметричный процесс. Поэтому примем, что окружная компонента v_θ вектора скорости равна нулю.

Условие несжимаемости в указанной системе координат с учетом принятого допущения имеет вид:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

а компоненты тензора скоростей деформаций определяются по формулам:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta = \frac{v_r}{r} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \gamma_{zr} = \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

Так как характер течения металла неизвестен, то рассмотрим несколько вариантов полей скоростей и для каждого из них определим необходимую величину давления обжатия. Наилучшим будет являться тот вариант, для которого величина давления имеет наименьшее значение. Допустимыми являются не только непрерывные, но и разрывные поля скоростей.

Рассмотрим следующие варианты деформирования заготовки:

- вариант № 1- непрерывное поле скоростей, при котором уменьшение наружного радиуса R происходит при увеличении длины l калибруемой части трубы;

- вариант № 2- непрерывное поле скоростей, при котором уменьшение наружного радиуса R происходит только за счет увеличения толщины стенки трубы t ;

- вариант №3- разрывное поле скоростей, при котором уменьшение наружного радиуса R происходит только за счет увеличения толщины стенки трубы t . В этом случае имеет место разрыв в радиальной компоненте скорости на границе между калибруемым участком и основной трубой.

Вариант № 1.

Кинематические краевые условия для данного варианта имеют вид:

$$v_r|_{z=0} = 0; \quad v_z|_{z=l} = 0. \quad (4)$$

Принимаем, что радиальная компонента скорости определяется выражением:

$$v_r = -rz. \quad (5)$$

При этом будет выполнено одно из условий (4).

Подставляя (5) в (2), находим:

$$v_z = z^2 + f_1(r), \quad (6)$$

где $f_1(r)$ - неизвестная функция.

Функцию $f_1(r)$ найдем из условия выполнения соотношений (4) и (1):

$$f_1(r) = -l^2. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), окончательно будем иметь:

$$v_z = z^2 - l^2. \quad (8)$$

Поле скоростей, в этом случае, описывается уравнениями вида:

$$\begin{cases} v_r = -rz \\ v_\theta = 0 \\ v_z = z^2 - l^2 \end{cases} \quad (9)$$

Из системы уравнений (3) определяем компоненты тензора скоростей деформаций:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = -z \\ \varepsilon_\theta = -z \\ \varepsilon_z = 2z \\ \gamma_{zr} = -r \end{cases} \quad (10)$$

Мощность пластической деформации определяется по формуле:

$$N_{nl} = k \int_V H dV, \quad (11)$$

где V – объем пластической области; k – предел текучести при сдвиге, осредненный по объему пластической области; H – интенсивность скоростей деформаций сдвига.

При принятых допущениях интенсивность скоростей деформаций сдвига равна:

$$H = \sqrt{2(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2) + \gamma_{zr}^2}. \quad (12)$$

Используя (10), (11) и (12), находим:

$$N_{nl} = 2\pi k \int_0^l \int_{R-t}^R \sqrt{12z^2 + r^2} r dr dz. \quad (13)$$

Для тонкостенных труб $t \ll R$. Поэтому при вычислении интеграла (13) можно принять $r \cong R$. С учетом этого упрощения выражение (13) принимает вид:

$$N_{nl} = 2\pi k \int_0^l \sqrt{12z^2 + R^2} dz. \quad (14)$$

Используя для вычисления интеграла (14) неравенство Коши-Буняковского, находим:

$$N_{nl} = 2\pi k R t l \sqrt{4l^2 + R^2}. \quad (15)$$

Мощность давления обжатия при калибровке определяется по формуле:

$$N_q = q \int_S v_r|_{r=R} dS, \quad (16)$$

где S – площадь наружной поверхности трубы, нагруженной давлением q .

Вычисляя с использованием соотношений (9) интеграл (16), получим:

$$N_q = q\pi R^2 l^2. \quad (17)$$

Для определения давления обжатия q используем уравнение баланса мощностей:

$$N_q = N_{nl}. \quad (18)$$

Из соотношений (18), (14) и (17) находим:

$$q_0 = \frac{2t}{l} \sqrt{1 + 4 \frac{l^2}{R^2}}, \quad (19)$$

где $q_0 = \frac{q}{k}$ – относительное значение давления обжатия.

Вариант № 2.

Кинематические краевые условия для варианта 2 имеют вид (4). Принимаем для радиальной компоненты скорости выражение:

$$v_r = -\frac{z}{r}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (2), находим:

$$v_z = 0. \quad (21)$$

Для полученных выражений (20) и (21) условия (4) выполняются.

Поле скоростей для варианта № 2 имеет вид:

$$\begin{cases} v_r = -\frac{z}{r} \\ v_\theta = 0 \\ v_z = 0 \end{cases}. \quad (22)$$

Применяя изложенную для варианта № 1 методику по определению мощности пластической деформации и мощности внешнего давления и используя уравнение баланса мощностей (18), получим формулу для определения относительного давления обжатия q_0 :

$$q_0 = \frac{2t}{l} \sqrt{1 + \frac{4}{3} \frac{l^2}{R^2}}, \quad (23)$$

Сопоставляя (19) и (23) приходим к выводу, что при любом сочетании геометрических параметров давление для варианта № 2 меньше давления для варианта № 1. Это означает, что кинематика варианта № 2 лучше описывает течение металла при калибровке обжатием по сравнению с вариантом № 1.

Вариант № 3.

В варианте 3 рассмотрим поле скоростей, при котором имеет место разрыв радиальной компоненты скорости на границе между калибруемым участком и основной трубой. В этом случае при моделировании кинематики первое из соотношений (4) не используется.

Принимаем, что радиальная компонента скорости определяется выражением:

$$v_r = -\frac{1}{r}. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (2), получаем:

$$v_z = 0. \quad (25)$$

Для принятых соотношений (24) и (25) условия (4) выполняются.

Поле скоростей для варианта № 3 имеет вид:

$$\begin{cases} v_r = -\frac{1}{r} \\ v_\theta = 0 \\ v_z = 0 \end{cases}. \quad (26)$$

Используя соотношения (26) и (11) находим, что мощность пластической деформации при условии $t \ll R$ равна:

$$N_{nl} = 4\pi k l \frac{t}{R}. \quad (27)$$

Мощность диссипации энергии на поверхности разрыва скоростей определяется по формуле:

$$D = \int_{S_p} k[v] dS, \quad (28)$$

где S_p – площадь поверхности разрыва скоростей; $[v]$ – величина разрыва скорости.

Величина разрыва скорости на поверхности между калибруемым участком и основной трубой равна:

$$[v] = \frac{1}{r}. \quad (29)$$

Подставляя (28) в (27), находим:

$$D = 2\pi k t. \quad (30)$$

По соотношениям (16) и (25) определяем мощность внешнего давления:

$$N_q = 2q\pi l. \quad (31)$$

Уравнение баланса мощностей в данном случае имеет вид:

$$N_q = N_{nl} + D. \quad (32)$$

Используя (27), (30), (31) и (32), находим, что относительное давление обжатия q_0 равно:

$$q_0 = \frac{t}{l} \left(1 + 2 \frac{l}{R}\right). \quad (33)$$

Из сопоставления зависимостей (23) и (33) следует, что при любой относительной длине $\frac{l}{R}$ калибруемого участка трубы $q_0^{II} \geq q_0^{III}$, где q_0^{II}, q_0^{III} - относительные давления обжатия для вариантов № 2 и № 3 соответственно.

На рисунке 4 представлены графические зависимости изменения относительного давления обжатия q_0 .

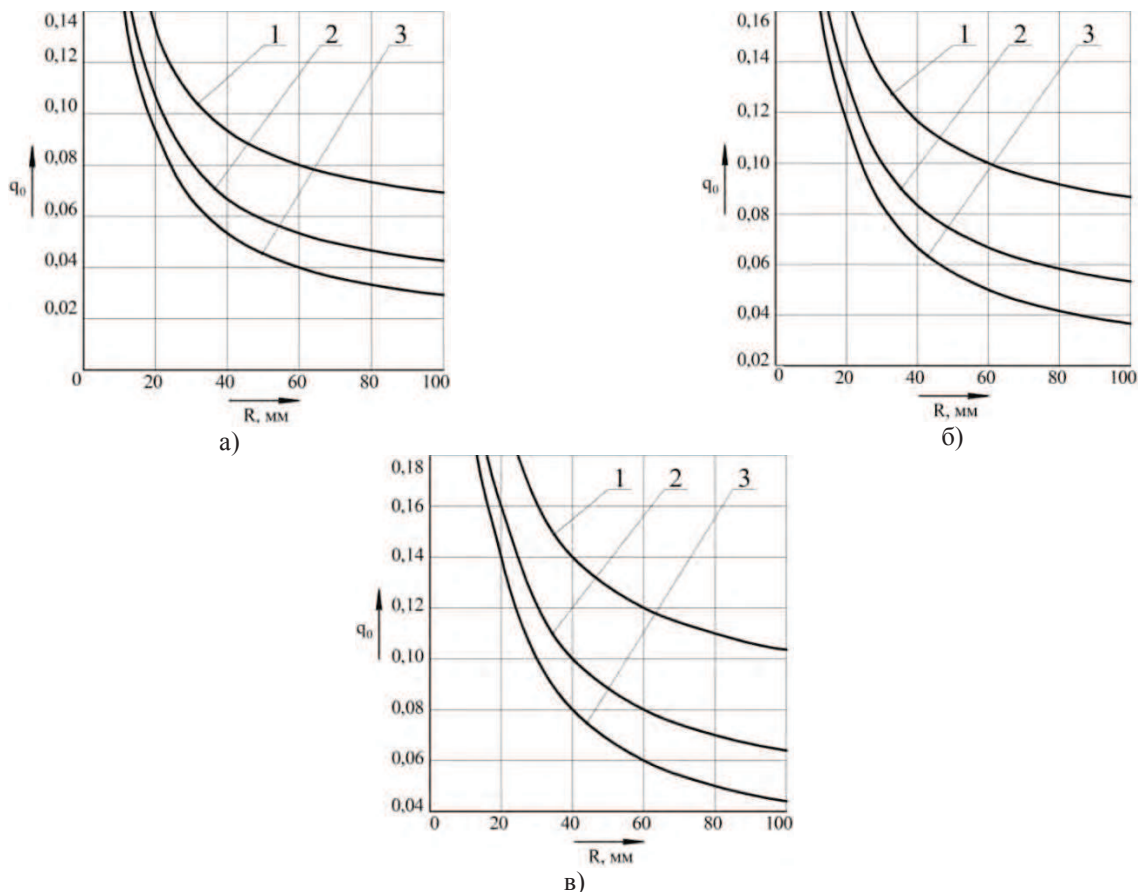


Рисунок 4 Зависимости между радиусом R калибруемой тонкостенной трубы и относительным давлением обжатия q_0 : а – при $t=0,8$ мм; б – при $t=1,0$ мм; в – при $t=1,2$ мм: при длине калибруемого участка трубы: 1 – $l=15$ мм, 2 – $l=30$ мм, 3 – $l=60$ мм

Можно сделать следующие выводы:

1. При описании пластического течения и определении энергосиловых параметров при калибровке трубы обжатием рекомендуется использовать кинематику по варианту № 3.

2. С увеличением шага подачи l при калибровке многосекторным инструментом требуемое давление обжатия q уменьшается (рисунок 4).

3. При одинаковом шаге подачи l трубу с меньшей относительной толщиной t/R необходимо калибровать меньшим давлением обжатия (рисунок 4).

4. С возрастанием предела текучести при сдвиге материала трубной заготовки давление обжатия q_0 увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1 Захарченко Н.Д., Салахетдинов З.Х. и др. Руководящий технический материал РТМ 1.4.1638 – 86. Конструктивно – технологическая обработка трубопроводных коммуникаций, изготовление и контроль труб и патрубков. М.: НИАТ, 1988. 576 с.

2 Голуб В.В., Егоров В.Г., Захарченко Н.Д. Ротационная вытяжка тонкостенных корпусов фильтродержателей // КШП. Обработка материалов давлением. 1998. №3. С.16-20.

3 Чумадин А.С., ЗоХейн Вин Расчет силовых параметров при ротационном обжиге труб // Науч. тр. МАТИ-РГТУ. 2013. №20. С.182-185.

4 Сосенушкин Е.Н., Третьякова Е.И. Экспериментальное исследование устойчивости трубной заготовки при комбинировании операций обжига и раздачи. М.: Рос. Ассоц. производителей станкоинструм. продукции “Станкоинструмент”, 2010. С.313-318.

REFERENCES

1 Zakharchenko N. D., Salakhedinov Z. Kh. Rukovodiashchii tekhnicheskii material RTM 1.4.1638 – 86. Konstruktivno-tekhnologicheskaiia obrabotka truboprovodnykh kommunikatsii, izgotovlenie i kontrol' trub i patrubkov [The leading technical material LTM 1.4.1638 – 86. Structurally – technological optimization of pipeline communications, production and control of pipes and branch pipes], Moscow, NIAT, 1988. 576 p. (In Russ.).

2 Golub V. V., Egorov V. G., Zakharchenko N. D. Rotary drawing of thin-walled cases of filter holders. *KShP. Obrabotka materialov davleniem*. [Press-forging production. Processing of materials by pressure], 1998, no. 3, pp.16-20. (In Russ.).

3 Chumadin A. S. Zo Hein Win Calculation of power parameters at rotational compression of pipes. *Nauch. tr. MATI-RGTU*. [Scientific work MATI-RSTU], 2013, no.20, pp.182-185. (In Russ.).

4 Sosenushkin E. N., Tret'iakova E.I. Ekspierimental'noe issledovanie ustoichivosti trubnoi zagotovki pri kombinirovanii operatsii obzhima i razdachi [Field research of stability of pipe preparation at a combination of operations of pressing and expansion]. Moscow, Ross. Assots. proizvoditelei stankoinstrum. produktsii “Stankoinstrument”, 2010. pp. 313-318. (In Russ.).