

КИНЕМАТИКА ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ БЕЗОПРАВОЧНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА

А.В. Выдрин¹, Е.В. Храмов¹, М.В. Буняшин²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

² АО «Волжский трубный завод», г. Волжский

Рассмотрен процесс безоправочной прокатки труб нефтяного сортамента. Получены зависимости определения параметров калибровки относительно известных обжатия и величины овализации калибра. Обосновано создание математической модели процесса редуцирования и работы извлекательно-калибровочного стана. Приведены зависимости определения основных параметров очага деформации. Получены системы уравнений для нахождения поверхности контакта металла трубной заготовки и инструмента для двухвалкового и трехвалкового калибров. Представлено поле скоростей металла трубной заготовки. Из условия, что осевая компонента вектора скорости изменяется по квадратичному закону и скорость металла на входе очага деформации со скоростью выхода из очага деформации связаны коэффициентом вытяжки, получена зависимость для определения этой компоненты вектора скорости. Обоснован линейный закон распределения радиальной компоненты вектора скорости металла трубной заготовки, из условия связи осевой компоненты вектора скорости и радиальной тангенсом угла между рассматриваемым сечением и вертикальной плоскостью симметрии вала получена зависимость для определения радиальной составляющей вектора скорости. Третья компонента вектора скорости определена из условия несжимаемости, которое определено для трехвалкового и двухвалкового калибра. На основе определенных компонент вектора скорости определены компоненты тензора скоростей деформации для трехвалкового и двухвалкового калибров. Компоненты тензора скоростей деформации рассчитаны для случая прокатки труб на редуцирующем трехвалковом стане. Произведена численная оценка компонент тензора скоростей деформации, определены компоненты тензора скоростей деформации, которые возможно не учитывать при проведении инженерных расчетов с использованием тензора скоростей деформации.

Ключевые слова: кинематика очага деформации; стан безоправочной прокатки труб; овальная калибровка; тензор скорости деформации.

В состав большинства современных трубопрокатных агрегатов (ТПА) входят станы для безоправочной прокатки. К таким станам относятся редуцирующе-растяжные (РРС), извлекательно-калибровочные (ИКС). РРС позволяют увеличить сортамент производимых на ТПА труб за счет дополнительного обжатия по наружному диаметру до 70 %, ИКС помимо обжатия по наружному диаметру, также выполняет функцию извлекателя оправки раскатного стана.

Наибольшее распространение получили непрерывные многоклетевые двух- или трехвалковые станы безоправочной прокатки. Так как они обладают наибольшей технологической гибкостью, достаточно легкой настройкой и имеют простую конструкцию. При этом зачастую используется овальная форма калибров. Такой калибр полностью определяется значениями ширины и высоты калибра, которые в свою очередь определяются значением овализации и величиной обжатия по наружному диаметру.

При известных ширине A и высоте B калибра радиус калибра R_k для трехвалковой клетки составит:

$$R_k = \frac{A^2 - AB + B^2}{A - 2B}. \quad (1)$$

Эксцентриситет калибра e составит при этом (рис. 1):

$$e = R_k - B. \quad (2)$$

Математическое описание процесса прокатки труб на таких станах является важной задачей, поскольку позволит решить ряд задач, таких как определение формоизменения металла в процессе прокатки, энергосиловых параметров и т. п.

В первую очередь при разработке математической модели решаются геометрическая и кинематическая задачи. Известна методика определения геометрических и кинематических параметров очага деформации в декартовой системе координат [1]. Однако ввиду существенной нелинейности заготовки и калибра, при этом получаются достаточно сложные математические зависимости. Гораздо проще вопрос решается в цилиндрической системе координат. Решение геометрической задачи подразумевает символическое определение следующих параметров очага деформации: наружный диаметр трубы d или радиус r в любом сечении очага деформации, длина очага деформации l , угол захвата α_0 (рис. 2).

Общеизвестно, что:

$$l = \sqrt{R_B(d_0 - d_1)}; \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{d_0 - d_1}{R_B}}. \quad (4)$$

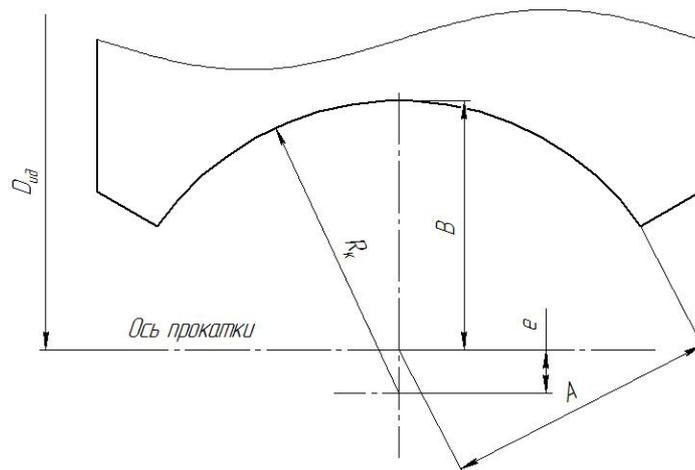


Рис. 1. Схема калибра

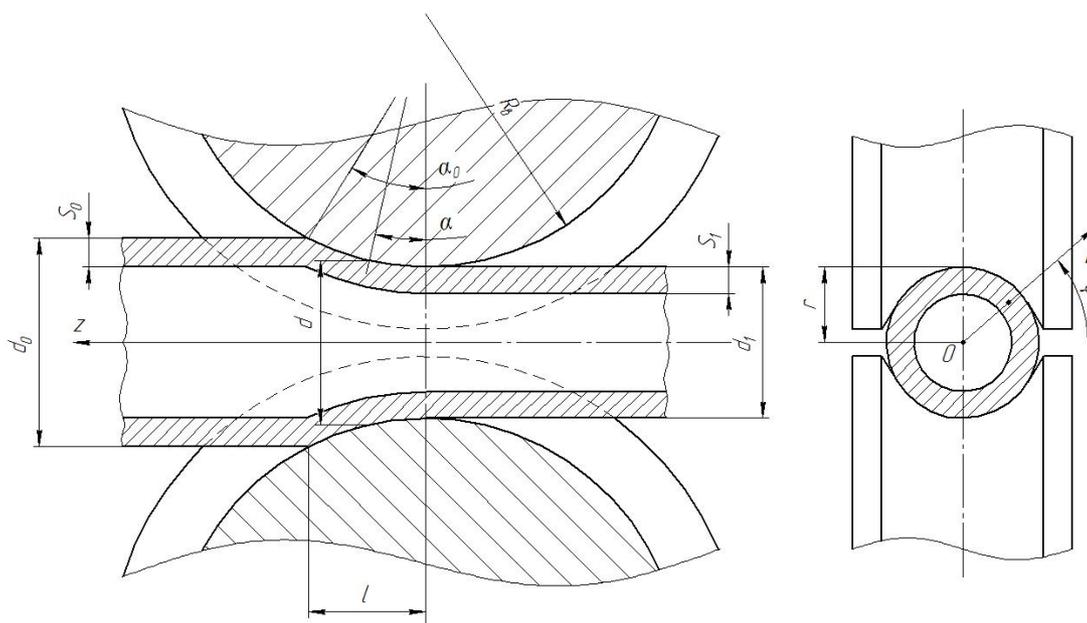


Рис. 2. Схема очага деформации

В соответствие с введенной цилиндрической системой координат наружная поверхность на выходе из очага деформации описывается функцией:

$$\rho = \sqrt{R_k^2 - e^2 \cos^2 \varphi} - e \sin \varphi. \quad (5)$$

В данном случае ρ будет являться наружным радиусом трубы. Поскольку двухвалковый калибр имеет две оси симметрии, а трехвалковый – три, то для двухвалкового можно рассматривать четверть очага деформации $\varphi \in [0; \pi/2]$, для трехвалкового – шестую часть: $\varphi \in [\pi/6; \pi/2]$.

Наружная поверхность трубной заготовки в цилиндрической системе координат описывается функцией:

$$\rho = r_0. \quad (6)$$

Наружная поверхность вала выражается из уравнения тора:

$$\begin{aligned} \rho \sin \varphi &= \\ &= R_{ид} - \sqrt{\left(R_{ид} + e - \sqrt{R^2 - (\rho \cos \varphi)^2} \right)^2 - z^2}. \quad (7) \end{aligned}$$

Совместное решение уравнений (6) и (7) позволяет определить поверхность контакта металла трубной заготовки с валками первой клетки, а совместное решение уравнений (5) и (7) – для последующих клеток. Однако при этом необходимо учитывать, что валки каждой клетки развернуты относительно соседних на угол: для двухвалковых клеток – $\pi/2$, для трехвалковой – $\pi/3$. То есть при решении системы уравнений (5), (7) в уравнении (5) к φ прибавляется соответствующий угол кантовки.

Решение кинематической задачи при безоправочной прокатке труб нефтяного сортамента (тонкостенных) подразумевает построение поля скоро-

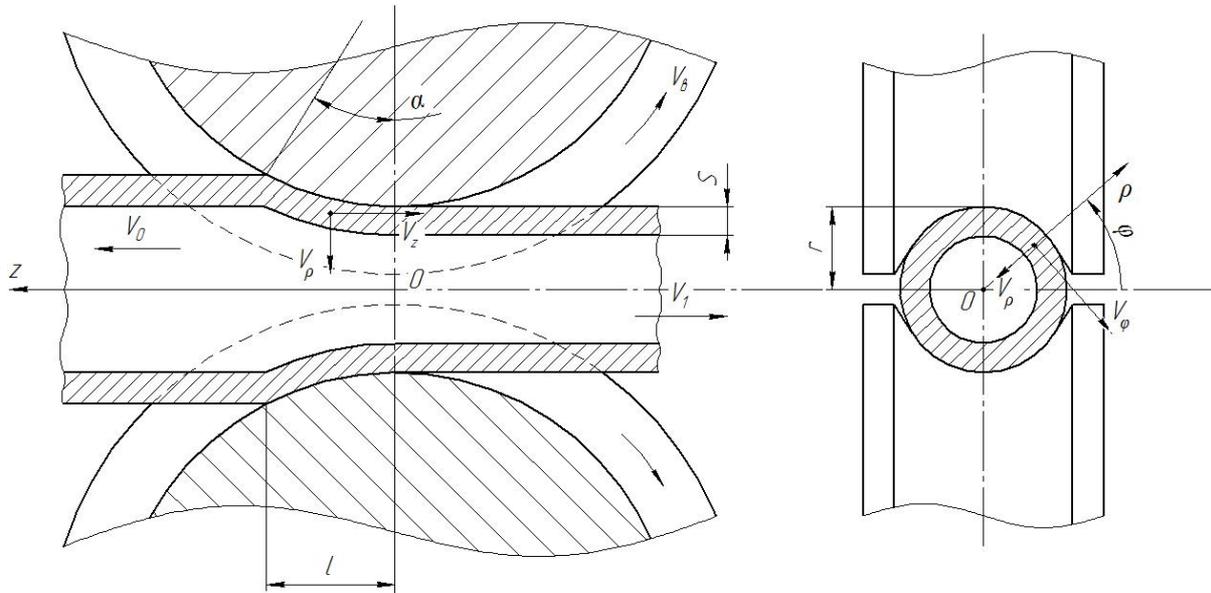


Рис. 3. Компоненты вектора скорости

стей металла трубы и определение тензора скорости деформации.

Вектор скорости в цилиндрической системе координат может быть представлен в виде (рис. 3):

$$\vec{V} = \begin{Bmatrix} V_z \\ V_\rho \\ V_\phi \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Компонента вектора скорости V_z в любом поперечном сечении очага деформации должна распределяться равномерно по этому сечению, так как в противном случае появится изгиб или кручение трубы. Поскольку считаем, что прокатный стан настроен правильно, подобные явления должны отсутствовать. Следовательно, данная компонента вектора скорости является функцией координаты z : $V_z = V_z(z)$.

Поскольку в продольном сечении очага деформации валок имеет форму окружности, принимаем, что компонента вектора скорости V_z изменяется вдоль очага деформации по параболическому закону, то есть

$$V_z = a_0 + a_1 z + a_2 z^2. \quad (9)$$

Для определения коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 воспользуемся следующим очевидным условием:

$$V_z|_{z=0} = V_1;$$

$$V_z|_{z=l} = V_0 = \frac{V_1}{\lambda};$$

$$\left. \frac{dV_z}{dz} \right|_{z=0} = 0,$$

где V_1 – скорость трубы на выходе из очага деформации; V_0 – скорость трубы на входе в очаг деформации; λ – коэффициент вытяжки.

С учетом этого получим:

$$V_z|_{z=0} = a_0 = V_1, \text{ т. е. } a_0 = V_1;$$

$$V_z|_{z=l} = V_1 + a_1 l + a_2 l^2 = \frac{V_1}{\lambda}, \text{ т. е.}$$

$$\frac{V_1}{\lambda} - V_1 = a_1 l + a_2 l^2;$$

из последнего равенства следует:

$$\frac{V_1}{l} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) = a_1 + a_2 l \text{ или } a_1 = \frac{V_1}{l} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) - a_2 l;$$

$$\frac{dV_z}{dz} = a_1 - 2a_2 z; \quad \left. \frac{dV_z}{dz} \right|_{z=0} = a_1 = 0, \text{ т. е. } a_1 = 0,$$

тогда

$$0 = \frac{V_1}{l} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) - a_2 l \text{ или } a_2 = \frac{V_1}{l^2} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right).$$

Окончательно для V_z можно записать:

$$V_z = V_1 + V_1 \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) \text{ или}$$

$$V_z = V_1 \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right]. \quad (10)$$

При определении зависимости для V_ρ в отличие от поля скоростей, построенного для случая прокатки трубы на оправке [2], будем считать, что $V_\rho = 0$ при $\rho = 0$.

По толщине стенки трубы V_ρ теоретически может распределяться по разным зависимостям (рис. 4). Однако ввиду рассмотрения прокатки тонкостенных труб, например, нефтяного сортамента, можно считать, что закон изменения $V_\rho(\rho)$ близок к линейному, то есть

$$V_\rho = b_0 + b_1 \rho, \text{ при } r-s \leq \rho \leq r.$$

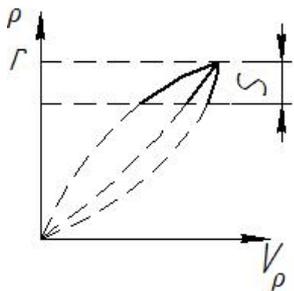


Рис. 4. Распределение компоненты вектора скорости V_ρ по толщине стенки

Поскольку труба в поперечном сечении имеет симметричный профиль, компонента вектора скорости V_ρ при фиксированной координате ρ будет постоянной по периметру поперечного сечения. Поэтому при определении коэффициентов b_0 и b_1 рассмотрим меридиональное сечение трубы, соответствующее вершине калибра ($\varphi = \pi/2$).

Из граничного условия $V_\rho|_{\rho=0} = 0$ следует, что $b_0 = 0$.

На контактной поверхности трубы и вала вектор скорости металла трубы должен быть направлен по касательной к этой поверхности. Это, в свою очередь, определяет соотношение между компонентами вектора скорости V_z и V_ρ :

$$V_\rho|_{\substack{\rho=r \\ \varphi=\pi/2}} = V_z \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – угловая координата произвольной точки на контактной поверхности (см. рис. 1).

Из простых геометрических построений следует, что $\alpha = z/R$, где R – радиус вала по вершине калибра.

Поскольку при деформации труб в станке-извлекателе и редуционных станах обжатия по диаметру относительно малы (как правило, не превышают 10%), угол α также достаточно мал, и можно принять:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha = \frac{z}{R}.$$

С учетом этого получаем:

$$V_\rho|_{\rho=r} = b_1 r = V_z \frac{z}{R} \quad \text{или} \quad b_1 r = V_1 \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right].$$

Следовательно

$$b_1 = \frac{V_1}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right].$$

Окончательно получим:

$$V_\rho = V_1 \frac{\rho}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right]. \quad (11)$$

Компонента вектора скорости V_φ может быть определена из условия несжимаемости. Условие

несжимаемости имеет вид: $\xi = 0$, где ξ – скорость относительного изменения объема, которая является первым инвариантом тензора скоростей деформации. Следовательно, можно записать

$$\xi = \xi_{\rho\rho} + \xi_{\varphi\varphi} + \xi_{zz} = 0,$$

где $\xi_{\rho\rho}$, $\xi_{\varphi\varphi}$, ξ_{zz} – компоненты тензора скорости деформации, расположенные на главной диагонали. В цилиндрической системе координат они вычисляются следующим образом [3]:

$$\xi_{\rho\rho} = \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} = \frac{V_1}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right];$$

$$\xi_{\varphi\varphi} = \frac{\partial V_\varphi}{\rho \cdot \partial \varphi} + \frac{V_\rho}{\rho} = \frac{\partial V_\varphi}{\rho \cdot \partial \varphi} + \frac{V_1}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right];$$

$$\xi_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = -V_1 \frac{2z}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right).$$

Отсюда получаем:

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = \left\{ V_1 \frac{2z}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{V_1}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] - \frac{V_1}{r} \frac{z}{R} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\} \rho$$

или

$$\begin{aligned} V_\varphi &= V_1 \left\{ \frac{2z}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{2z}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\} \rho \varphi + C = \\ &= 2\rho\varphi z V_1 \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\} + C. \end{aligned}$$

При прокатке в двухвалковом калибре прокатываемый трубный профиль имеет всегда две оси симметрии, одна из которых лежит в плоскости разреза калибра. Естественно, что благодаря этому тангенциальное течение металла в плоскости разреза калибра будет отсутствовать. Следовательно, для определения константы интегрирования C можно воспользоваться условием $V_\varphi|_{\varphi=0} = 0$, из которого следует, что $C = 0$. Таким образом, окончательно для двухвалкового калибра для V_φ можно записать:

$$V_\varphi = 2\rho\varphi z V_1 \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\}. \quad (12)$$

При прокатке в трехвалковом калибре трубный профиль имеет три оси симметрии и для него справедливо следующее: $V_\varphi|_{\varphi=\pi/6} = 0$, из которого следует, что

$$C = -2\rho \frac{\pi}{6} z V_1 \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\}.$$

Таким образом, окончательно для трехвалкового калибра для V_φ можно записать:

$$V_\varphi = 2\rho \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) z V_1 \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\}. \quad (13)$$

Построенное поле скоростей позволяет определить компоненты тензора скоростей деформации для двухвалкового калибра:

$$\begin{aligned} \xi_{\rho\rho} &= \frac{V_1 z}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right]; \\ \xi_{\varphi\varphi} &= 2z V_1 \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\} + \frac{V_1 z}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right]; \\ \xi_{zz} &= -V_1 \frac{2z}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right); \\ \xi_{\rho\varphi} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\varphi}{\partial \rho} + \frac{\partial V_\rho}{\rho \cdot \partial \varphi} + \frac{V_\varphi}{\rho} \right) = \frac{1}{2} \left\{ 2\varphi z V_1 \left\langle \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\rangle + \right. \\ &+ \left. 0 - 2\varphi z V_1 \left\langle \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\rangle \right\} = 0; \\ \xi_{\varphi z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\rho \cdot \partial \varphi} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \left\{ 0 + 2\varphi \rho V_1 \left\langle \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] \right\rangle + \right. \\ &+ \left. 2\varphi z V_1 \rho \frac{2z}{rR l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right\} = \varphi V_1 \rho \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] + \frac{2z^2}{rR l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right\}; \\ \xi_{z\rho} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial \rho} \right) = \frac{1}{2} \left\{ V_1 \frac{\rho}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] + V_1 \frac{\rho z}{rR} \left[-\frac{2z}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] + 0 \right\} = \frac{\rho V_1}{2rR} \left[1 - 3 \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Для трехвалкового калибра компоненты тензора скоростей деформации не отличаются за исключением $\xi_{\varphi z}$, которая выражается как:

$$\xi_{\varphi z} = \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) V_1 \rho \left\{ \frac{1}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) - \frac{1}{rR} \left[1 - \frac{z^2}{l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right] + \frac{2z^2}{rR l^2} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right) \right\}. \quad (15)$$

Для численной оценки компонентов тензора скоростей деформации последние были рассчитаны для случая прокатки трубы размерами 73×6 мм из трубной заготовки 152×6 мм. На рис. 5 представлена зависимость компонентов тензора скоростей деформации для первой клетки от величины обжатия и их распределение по длине очага деформации. При этом настроечные параметры использовались следующие: $\lambda = 1,03$, обжатие – 3,2 %; $V_0 = 1000$ мм/с.

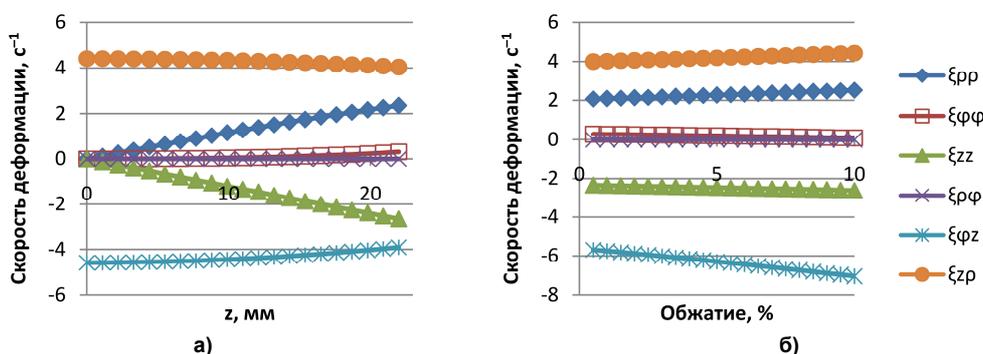


Рис. 5. Компоненты тензора скоростей деформации: а – по длине очага деформации; б – в зависимости от величины обжатия по наружному диаметру

Как видно из рис. 5, б), компонента тензора и $\xi_{\varphi\varphi}$ значительно меньше остальных составляющих, а компонента $\xi_{\rho\varphi}$ равна нулю, что позволяет не учитывать их в инженерных расчетах. Таким образом, определена кинематика очага деформации при безправочной прокатке труб в двух- и трехвалковом калибрах с точностью до V_1 .

Литература

1. Блинов, Ю.И. Продольная прокатка труб в многовалковых калибрах / Ю.И. Блинов. – Челябинск: металл, 1992. – 240 с.
2. Выдрин, А.В. Компьютерное моделирование скоростного режима непрерывной прокатки

труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // Сталь. – 2011. – № 2. – С. 56–58.

3. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ., 2001. – 836 с.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vydrinav@susu.ru.

Храмков Евгений Владимирович, аспирант кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; hramkov@rosniti.ru.

Бунышин Михаил Васильевич, начальник центральной заводской лаборатории, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский; vtz@vtz.ru.

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

DOI: 10.14529/met160113

KINEMATICS OF THE DEFORMATION ZONE IN PLUGLESS ROLLING OF OIL PIPES

A.V. Vydrin¹, vydrinav@susu.ru,
E.V. Khramkov¹, hramkov@rosniti.ru,
M.V. Bunyashin², vtz@vtz.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russian Federation

This article describes the process of plugless rolling of oil pipes. Correlations between caliber parameters and swaging were obtained. The mathematical model of the process of plugless rolling of pipes was made. Main parameters of the deformation zone were determined. A set of equations to determine the surface of the contact area of the round billet and the tool for two-roll and three-roll calibers was obtained. The velocity field of metal billets was presented. From the assumption that the axial component of the velocity vector changes according to the quadratic law and the metal entrance velocity in the deformation zone is connected with the exit velocity from the deformation zone by the reduction ratio, the dependence for the determination of this component of the velocity vector was obtained. The linear function of the radial component of the velocity vector was justified. From the relation of axial and radial components of the velocity vector by the tangent of the angle between the considered section and the vertical symmetry plane of the roll a dependence for the determination of the radial component of the velocity vector was defined. The third component of the velocity vector was determined subject to the incompressibility condition, which was defined for three-roll and two-roll calibers. Based on the determined components of the velocity vector, the components of the strain velocity tensor were defined for three-roll and two-roll calibers. The components of the strain velocity tensor were calculated for the case of rolling tubes in a three-roll reduction mill. The components of the strain velocity tensor were numerically estimated, and the components of the strain velocity tensor that may be neglected in engineering calculations were determined.

Keywords: kinematics of deformation zone; plugless tube rolling mill; oval calibration; strain velocity tensor.

References

1. Blinov Yu.I. *Prodol'naya prokatka trub v mnogovalkovykh kalibrakh* [Longitudinal Rolling of Pipes in Multi-Roll Calibers]. Chelyabinsk, Metall Publ., 1992. 240 p.

2. Vydrin A.V., Shirokov V.V. Speed Simulation of Continuous Pipe Rolling. *Steel in Translation*, 2011, vol. 41, no. 2. pp. 140–142. DOI: 10.3103/S0967091211020215

3. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of Metal Forming]. Ekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2001. 836 p.

Received 6 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Выдрин, А.В. Кинематика очага деформации при безправочной прокатке труб нефтяного сортамента / А.В. Выдрин, Е.В. Храмов, М.В. Буняшин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 91–97. DOI: 10.14529/met160113

FOR CITATION

Vydrin A.V., Khramkov E.V., Bunyashin M.V. Kinematics of the Deformation Zone in Plugless Rolling of Oil Pipes . *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 91–97. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160113
