

УДК 621.771.01

Н.Е. Нехаев, к.т.н, доц., М.К. Измайлова, к.т.н, доц., Е.В. Галицкий, к.т.н, доц.
Днепропетровский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИ ВОЗМОЖНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПРИ ПРОКАТКЕ П-ОБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЁХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

В статті розглянута кінематика осередку деформації при прокатці П-подібних профілів в чотирьохвалковому калібрі. В ході аналізу зони контакту, приймаючи гіпотезу плоских перетинів, обрано кінематично можливе поле швидкостей, що може бути використане при дослідженні формозмінення металу в калібрі.

In paper the observed kinematics of the byte for of deformation at rolling of P-like profiles in four rolls the pass. During the assaying of a zone of contact, accepting a hypothesis of plane sections, the kinematic possible field of speeds which can be used at exploration of a forming of metal in the pass is gained.

При исследовании кинематики очага деформации при прокатке П-образных профилей в четырёхвалковых калибрах для компонент поля скоростей v_x , v_y , v_z используем [1-3] гипотезу плоских сечений, условие несжимаемости для скоростей относительных удлинений и модель жёсткопластической среды.

Деформации во внешних зонах очага деформации не учитываем. Полагаем при этом, что в плоскости выхода полосы из валков деформация полностью заканчивается, а на входе полосы в геометрический очаг деформации внешнюю зону учитываем в виде мощности сил среза.

Очаг деформации (рис. 1) делим на три характерных участка: обжимаемый приводными горизонтальными валками активный участок 1, переходной участок 2, обжимаемый горизонтальными приводными валками и вертикальными не приводными валками и участок 3 – полки профиля, обжимаемые между вертикальной поверхностью горизонтальных валков и вертикальными холостыми валками.

Ввиду симметрии относительно продольно-вертикальной плоскости рассматриваем $\frac{1}{2}$ часть очага деформации.

Для задаваемого исходного сечения не учитываем деформацию на наружной поверхности в месте стыка стенки и полки профиля. Такая форма исходного сечения предотвращает переполнение калибра в процессе прокатки и соответствует реальному процессу в промышленных условиях.

Дело в том, что диаметр горизонтальных валков значительно больше, чем вертикальных. Кроме того, основное обжатие осуществляется горизонтальными приводными валками. Поэтому при задаче полос вначале происходит захват горизонтальными приводными валками. В результате на начальной стадии захвата происходит уширение стенки, которое при захвате вертикальными валками приводит к переполнению калибра и образованию "лампасов". По мере прохождения полосы через очаг деформации лампасы деформируются между горизонтальными и вертикальными валками и получают значительное вынужденное уширение. Очевидно, что для устранения этого дефекта на исходной задаваемой полосе необходимо предусматривать закругление наружных углов.

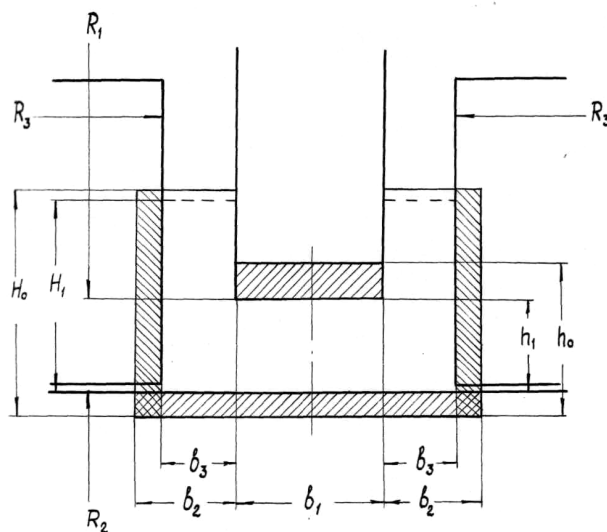


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке П-образных профилей в четырёхвалковом калибре

Так как П-образный профиль не имеет продольно-горизонтальной плоскости, то в очаге деформации абсолютные обжатия со стороны верхней и нижней поверхностей стенки неодинаковы. Если предположить, что распределение абсолютных обжатий стенки соответствует одинаковым контактным поверхностям (их проекциям на горизонтальную плоскость), то при равенстве катающих радиусов верхнего и нижнего горизонтального валков имеем (рис. 1):

$$b_1 \sqrt{R \Delta h_1} = (b_1 + 2b_3) \sqrt{R_1 (h_0 - h_1 - \Delta h_1)},$$

где Δh_1 – абсолютное обжатие со стороны верхнего горизонтального валка.

После несложных преобразований:

$$\Delta h_1 = (h_0 + h_1)(b_1 + 2b_3)^2 [b_1^2 + (b_1 + 2b_3)^2]^{-1}.$$

Если теперь определить длину очага деформации со стороны верхнего горизонтального, нижнего горизонтального и вертикального валков, то наибольшей будет длина очага деформации со стороны верхнего горизонтального валка:

$$l = \sqrt{R_1 \Delta h_1}.$$

Поэтому при определении общей протяженности очага деформации в продольном направлении используем приём выравнивания длин, принимая за основу максимальную длину l при фактических абсолютных обжатиях со стороны горизонтальных и вертикальных валков.

Уравнение поверхности верхнего горизонтального валка, разрешённое относительно аппликаты, запишется в виде:

$$F_{z1} = R_1 + 0,5h_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (1)$$

Поверхность нижнего горизонтального валка при абсолютном обжатии $h_0 - h_1 = \Delta h_1$ представим как поверхности параболического цилиндра:

$$F_{z2} = -0,5h_1 - (h_0 - h_1 - \Delta h_1) \frac{x^2}{l^2}. \quad (2)$$

Также в виде параболического цилиндра записывается и уравнение поверхности вертикального валка, разрешённое относительно ординаты:

$$F_y = 0,5b_1 + b_3 + (b_2 - b_3) \frac{x^2}{l^2}.$$

После того, как определена геометрия очага деформации, переходим к выбору кинематически возможного поля скоростей перемещений.

Скорость продольного перемещения V_x , которая одинакова для всех участков, равна [1]:

$$V_x = -V_0 a_1 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right], \quad (3)$$

где V_0 – окружная скорость верхнего валка;

$a_1 = \frac{V_1}{V_0}$ – коэффициент опережения;

$\lambda = \frac{V_1}{V_0}$ – коэффициент вытяжки;

V_1 – скорость полосы при $x = 0$;

V_0 – скорость полосы при $x = l$.

Варьируемыми параметрами, подлежащими определению при решении вариационной задачи, являются коэффициенты λ и a_1 . В то же время при расчёте калибровки определяющим фактором является коэффициент утяжки $\delta = \frac{H_1}{H_0}$, а не коэффициент вытяжки λ . Значение δ находится из условия постоянства объёма:

$$\delta = 2b_2 H_1 [b_1 h_1 \lambda - b_1 h_0 + 2(b_2 - b_3)(h_0 - h_1 - \Delta h_1) + 2b_3 \lambda H_1]^{-1}.$$

Далее на основании (3) определяем скорость относительного удлинения:

$$\xi_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} = 3V_0 a_1 \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^2}{l^3}.$$

Вертикальную скорость перемещения V_{z1} на участке 1 в соответствии с гипотезой плоских сечений представим в виде линейной функции:

$$V_{z1} = c_0 + c_1 z.$$

Согласно граничным условиям:

$$V_{z_1}|_{z=F_{z_1}} = V_{z_1\kappa_1}, \quad V_{z_1}|_{z=F_{z_2}} = V_{z_1\kappa_2},$$

получим:

$$\begin{aligned} V_{z_1} &= V_{z_1\kappa_2} + \xi_{z_1} (z - F_{z_2}), \\ \xi_{z_1} &= \frac{\partial V_{z_1}}{\partial z} = -\frac{V_{z_1\kappa_2} - V_{z_1\kappa_1}}{F_{z_1} - F_{z_2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $V_{z_1\kappa_1}$ и $V_{z_1\kappa_2}$ – скорость V_{z_1} на контактных поверхностях F_{z_1} и F_{z_2} соответственно,

Скорости $V_{z_1\kappa_1}$ и $V_{z_1\kappa_2}$ – определяются из условия непроницаемости, которое для поверхностей F_{z_1} и F_{z_2} , при $\frac{\partial F_{z_1}}{\partial y} = 0$ и $\frac{\partial F_{z_2}}{\partial y} = 0$, имеет вид:

$$V_{z_1\kappa_1} = V_x \frac{\partial F_{z_1}}{\partial x}, \quad V_{z_1\kappa_2} = V_x \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x}.$$

При этом из (1) и (2) находим:

$$\frac{\partial F_{z_1}}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R_1^2 - x^2}}, \quad \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x} = 2 \frac{h_0 - h_1 - \Delta h_1}{l^2} x.$$

Скорость поперечного перемещения V_{y_1} на участке 1 определяется из условия несжимаемости:

$$\xi_{y_1} = \frac{\partial V_{y_1}}{\partial y} = -(\xi_x + \xi_{z_1}). \quad (5)$$

Интегрируя (5) с учётом граничного условия $V_{y_1}|_{y=0} = 0$, находим:

$$V_{y_1} = \xi_{y_1} \cdot y.$$

Далее переходим к выбору кинематически возможного поля скоростей на переходном участке 2.

Скорость V_{y_2} представим в виде полинома:

$$V_y = c_0 + c_1 y + c_2 y^2. \quad (6)$$

Согласно граничным условиям:

$$\begin{cases} \text{при } y = 0, 5b_1 & V_{y_2} = V_{y_1}, \xi_{y_2} = \xi_{y_1}; \\ \text{при } y = F_y & V_{y_2} = V_{y_2\kappa}, \end{cases}$$

находим из (6) значения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 :

$$\begin{cases} c_0 = 0, 25c_2 b_1^2, \\ c_1 = \xi_{y_1} - c_2 b_1, \\ c_2 = \frac{V_{y_2\kappa} - \xi_{y_1} F_y}{0, 25b_1^2 - F b_1 + F_y^2}, \end{cases}$$

где в соответствии с условием непроницаемости скорость $V_{y_2\kappa}$, на контактной поверхности F_y равна:

$$V_{y_2\kappa} = V_x \frac{\partial F_y}{\partial x}.$$

Из (6) имеем:

$$\xi_{y_2} = \frac{\partial V_{y_2}}{\partial y} = c_1 + 2c_2 y.$$

Скорость V_{z_2} определяем из условия несжимаемости на участке 2:

$$\xi_{z_2} = -(\xi_x + \xi_{y_2}). \quad (7)$$

Интегрируя (7) и согласно граничному условию $V_{z_2} = V_{z_1\kappa_2}$ при $z = F_{z_2}$, получим:

$$V_{z_2} = V_{z_1\kappa_2} + \xi_{z_2} (z - F_{z_2}).$$

При этом в дальнейшем при вычислении скоростей относительных сдвигов следует иметь в виду, что функции V_{z_2} и ξ_{z_2} зависят от y .

На участке 3 выбор кинематически возможного поля скоростей начинаем с поперечной составляющей V_{y_3} , которую в соответствии с гипотезой плоских сечений аппроксимируем линейной функцией:

$$V_{y_3} = c_0 + c_1 y. \quad (8)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} \text{при } y = 0, 5b_1 & V_{y3} = 0, \\ \text{при } y = F_y & V_{y3} = V_{y3к}. \end{cases}$$

Тогда имеем из уравнения (8):

$$V_{y3} = \xi_{y3} (y - 0, 5b_1),$$

где $\xi_{y3} = V_x \left(\frac{1}{|F_y - 0, 5b_1|} \right) \frac{\partial F_y}{\partial x}$; $V_{y3к} = V_x \frac{\partial F}{\partial x}$.

После интегрирования условия несжимаемости для участка 3 в виде:

$$\xi_{z3} = -(\xi_x + \xi_{y3})$$

при граничном условии:

$$V_{z3} = V_{z2} \text{ при } z = F_{z1},$$

определяем компоненту V_{z3} :

$$V_{z3} = V_{z2}|_{z=F_{z1}} + \xi_{z3} (z - F_{z1}),$$

где $V_{z2}|_{z=F_{z1}}$ в соответствии с (4) равна:

$$V_{z2}|_{z=F_{z1}} = V_{z1 \times 2} + \xi_{z2} (F_{z1} - F_{z2}).$$

Скорости относительных сдвигов вычисляются из соотношения:

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial j} + \frac{\partial V_j}{\partial i} \right) \quad i, j = x, y, z \text{ при } i \neq j.$$

Выводы

Полностью рассмотрено определение кинематически возможного поля скоростей перемещений и скоростей относительных удлинений, которые используются для решения вариационной задачи при прокатке П-образных профилей в четырёхвалковых калибрах.

Список литературы

1. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович // М.: Металлургия. 1972. – 352 с.
2. Илюкович Б. М. Определение формоизменения при прокатке фланцевых профилей в четырёхвалковых калибрах / Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 1991, № 1. – С.45-47.
3. Измайлова М. К. Построение кинематически возможного поля скоростей при прокатке фланцевых профилей в четырёхвалковых калибрах / М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев, В. В. Степчук // Обробка матеріалів тиском. Збірник наукових праць ДДМА. 2009, №2 (21) – С.90-96.