

УДК 621.771.01

Измайлова М. К.
Нехаев Н. Е.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИ ВОЗМОЖНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ
ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ
В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ**

Использование многовалковых калибров обеспечивает возможность горячей прокатки сложных фасонных профилей за малое количество пропусков [1]. Это позволяет значительно повысить эффективность процесса горячей прокатки во всем технологическом цикле производства профилей высокой точности и в конечном итоге, существенно снизить затраты данного производства [1–3].

Однако, несмотря на явные преимущества, многовалковые калибры еще не находят достаточно широкого применения при прокатке целого ряда фланцевых профилей из-за проблемы качественного их заполнения. В решении существующей проблемы ведущая роль принадлежит рациональной калибровке, при разработке которой необходимо правильно рассчитывать формоизменение металла и энергосиловые параметры.

Одним из методов решения задач по определению формоизменения металла при прокатке являются вариационные методы.

Общий подход к решению вариационных задач для целого класса фланцевых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах, предложен в работах [4, 5]. Согласно предложенной методике кинематически возможное поле скоростей выбирается для четырех типовых участков, из комбинации которых можно составить все фланцевые профили: двутавровые, швеллерные, тавровые, угловые и зетообразные. Стыковка участков и удовлетворение граничным условиям должны конкретизироваться для каждого отдельного профиля.

Профили двутавра и швеллера можно считать характерными для всего класса фланцевых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах, так как они содержат все типовые участки, из комбинации которых можно составить все остальные профили.

В работе [6] представлено кинематически возможное поле скоростей при прокатке швеллерных профилей.

Целью данной работы является определение кинематически возможного поля скоростей для двутавровых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах (рис. 1). Это позволит легко перейти к выбору поля скоростей для других фланцевых профилей.

Для определенности рассмотрим симметричный калибр, т. е. $b_{02} = b_{01}$; $b_{12} = b_{11}$; $H_{02} = H_{01}$; $H_{12} = H_{11}$ (рис. 1).

Ввиду симметрии относительно продольно-вертикальной и продольно-горизонтальной плоскостей рассматриваем $\frac{1}{4}$ часть очага деформации.

Деформация металла осуществляется горизонтальными приводными и вертикальными неприводными валками.

Очаг деформации (рис. 1) разделен на три характерных участка.

Участок 1 деформируется непосредственно валками и является активным участком. Участок 1 разделен при свободном уширении критическим сечением b_k , которое является границей раздела течения металла в поперечном направлении.

Участок 2 представляет собой переходный участок, который деформируется за счет продольного взаимодействия всех участков прокатываемой полосы. В поперечном направлении на этот участок поступает металл за счет обжатия $b_{02} - b_{12}$ вертикальным валком и за счет поступления металла при уширении на участке 1. Этот поступающий металл расходуется в основном на удлинение участка 2. При этом возможно как приращение, так и уменьшение высоты участка 2.

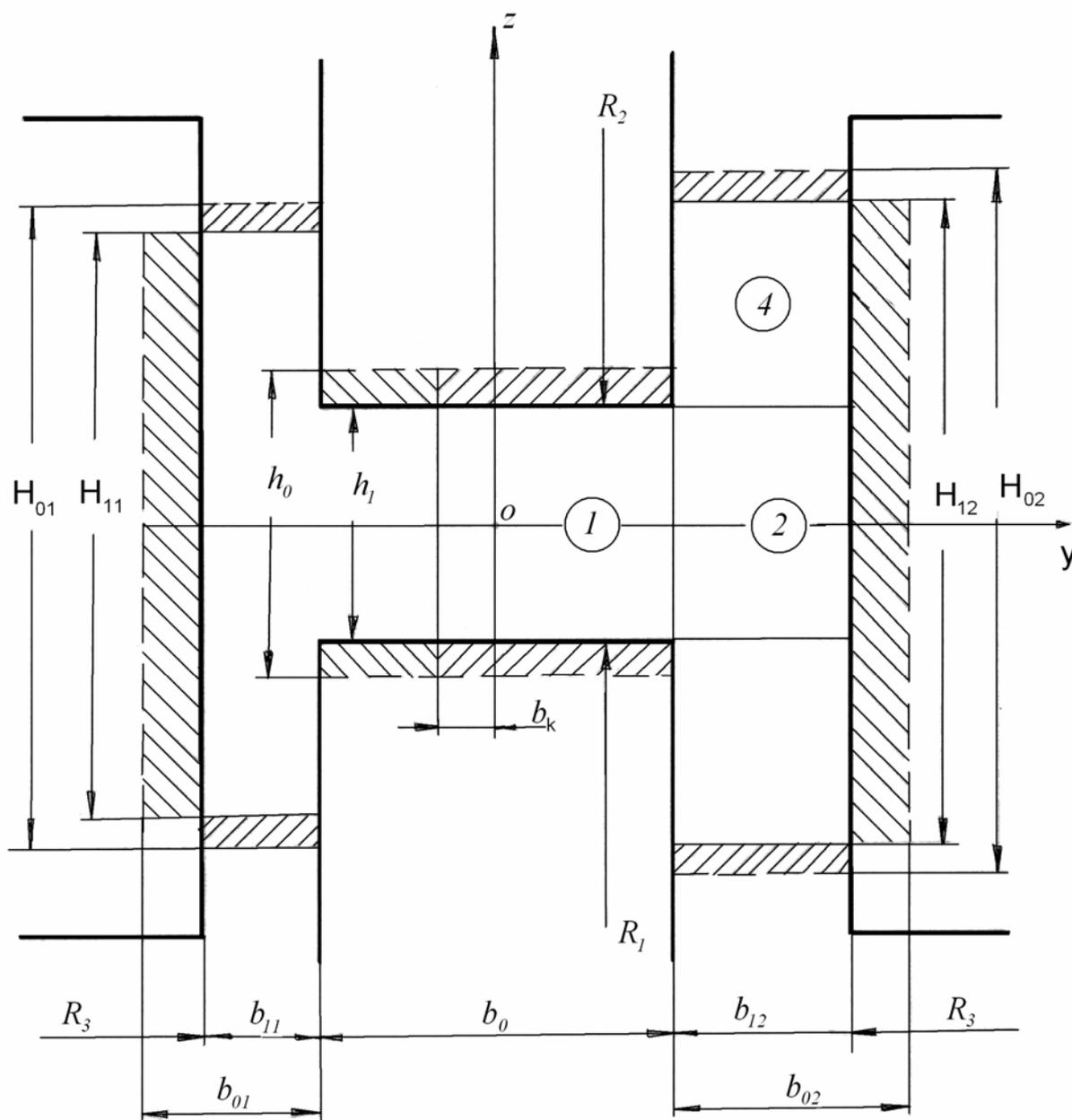


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковом калибре

Участок 4 деформируется за счет проволочивания его между поверхностями горизонтального и вертикального валков, когда вертикальный валок является неприводным валком. Если же вертикальные валки – приводные, то участок 4 представляет собой активный участок.

При исследовании кинематики очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковых калибрах для компонент поля скоростей v_x , v_y , v_z используем [7] 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.

Принимаем правую систему координат. Ось Ox направлена против хода прокатки. Уравнение поверхностей нижнего F_{z_1} и верхнего F_{z_2} горизонтальных валков ($R_1 = R_2 = R$):

$$F_{z_1} = -R - 0,5h_1 + \sqrt{R^2 - x^2}; \quad F_{z_2} = -F_{z_1}. \quad (1)$$

Уравнение поверхности правого вертикального вала:

$$F_{y_3} = R_3 + (0,5b_0 + b_{12}) - \sqrt{R_3^2 - x^2}. \quad (2)$$

Длина очага деформации l на активном участке 1 (горизонтальные валки):

$$l = \sqrt{R^2 - [R - 0,5(h_0 - h_1)]^2}, \quad (3)$$

а на участках 2 и 4 (вертикальный валок):

$$l_3 = \sqrt{R_3^2 - [R_3 - (b_{02} - b_{12})]^2}. \quad (4)$$

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, задаем в виде полинома третьей степени по x :

$$v_x = -a_1 v_e \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right], \quad (5)$$

где

v_e – окружная скорость горизонтальных валков;

$a_1 = \frac{v_1}{v_e}$ – коэффициент опережения;

$\lambda = \frac{v_1}{v_0}$ – коэффициент вытяжки;

v_1 – скорость выхода полосы из валков;

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 $\delta = \frac{H_{12}}{H_{02}}$, а не коэффициент вытяжки λ . Значение δ находится из условия постоянства объёма:

$$\delta = \lambda b_{12} H_{12} [0,5b_0(h_0 - \lambda h_1) + b_{02} H_{12}]^{-1}. \quad (6)$$

Далее на основании (5) определяем скорость относительного удлинения:

$$\xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = 3v_e a_1 \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^2}{l^3}. \quad (7)$$

Определим поле скоростей на участках 1, 2 и 4.

Участок 1 (рис.1). Скорость вертикального перемещения в соответствии с [7] равна:

$$v_{z_1} = \frac{v_{zk_2}}{F_{z_2}} z. \quad (8)$$

Скорость v_{zk_2} определяется из условия непроницаемости:

$$v_{zk_2} = v_x \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x}.$$

При этом из (1) находим:

$$\frac{\partial F_{z_2}}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R_2^2 - x^2}}.$$

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

$$\xi_{y_1} = \frac{\partial v_{y_1}}{\partial y} = -(\xi_x + \xi_{z_1}). \quad (9)$$

Интегрируя (9) с учётом граничного условия $v_{y_1}|_{y=b_k} = 0$, находим:

$$v_{y_1} = -(\xi_x + \xi_{z_1})(y - b_k). \quad (10)$$

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

Задавая v_{y_2} в виде:

$$v_{y_2} = B_0 + B_1 y \quad (11)$$

и удовлетворяя граничным условиям:

$$\text{при } y = 0,5b_0 : v_{y_2} = v_{y_1};$$

$$\text{при } y = F_{y_3} : v_{y_2} = v_{yk_3},$$

где v_{yk_3} – поперечная компонента скорости на контактной поверхности F_{y_3} , находим:

$$v_{y_2} = v_{y_1}^* + \frac{v_{yk_3} - v_{y_1}^*}{F_{y_3} - 0,5b_0}(y - 0,5b_0); \quad (12)$$

$$\text{здесь } v_{y_1}^* = v_{y_1}|_{y=0,5b_0}; \quad v_{yk_3} = v_x \frac{\partial F_{y_3}}{\partial x}; \quad \frac{\partial F_{y_3}}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R_3^2 - x^2}}.$$

Из условия несжимаемости с учетом граничного условия $v_{z_2} = 0$ при $z = 0$ находим:

$$v_{z_2} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y_2}}{\partial y}\right)z, \quad (13)$$

$$\text{где } \frac{\partial v_{y_2}}{\partial y} = \frac{v_{yk_3} - v_{y_1}^*}{F_{y_3} - 0,5b_0}.$$

Участок 4. Задаем компоненту v_{y_4} аналогично v_{y_2} в виде ряда (11).

Удовлетворяя граничным условиям:

$$\text{при } y = 0,5b_0 : v_{y_4} = 0;$$

$$\text{при } y = F_{y_3} : v_{y_4} = v_{yk_3},$$

находим:

$$v_{y_4} = \frac{v_{y_{k_3}}}{F_{y_3} - 0,5b_0} (y - 0,5b_0). \quad (14)$$

Тогда из условия несжимаемости при граничном условии:

$$\text{при } z = F_{z_2} : v_{z_4} = v_{z_2},$$

находим вертикальную составляющую скорости на участке 4:

$$v_{z_4} = v_{z_2} \Big|_{z=F_{z_2}} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y_4}}{\partial y} \right) (F_{z_2} - z). \quad (15)$$

$$\text{Здесь } \frac{\partial v_{y_4}}{\partial y} = \frac{v_{y_{k_3}}}{F_{y_3} - 0,5b_0}.$$

Таким образом, нами определено кинематически возможное поле скоростей при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах. Полученное поле скоростей предназначено для решения вариационной задачи и определения формоизменения и энерго-силовых параметров при прокатке двутавровых профилей.

ВЫВОДЫ

Рассмотрено определение кинематически возможного поля скоростей перемещений и скоростей относительных удлинений, которые используются для решения вариационной задачи при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковых калибрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6-ти томах. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – 518 с.
2. Тубольцев А. Г. Опыт и проблемы применения кассет конструкции ДМетИ с неприводными вертикальными валами при прокатке швеллеров / А. Г. Тубольцев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – С. 226–231.
3. Огинский И. К. Оборудование и технология на основе многовалковых калибров для производства простых, фасонных и специальных профилей / И. К. Огинский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8-9. – С. 231–234.
4. Илюкович Б. М. Определение формоизменения при прокатке фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах / Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев // *Изв. вуз. Черная металлургия*. – 1991. – № 1. – С. 45–47.
5. 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*. – Краматорськ : ДДМА, 2009. – № 2 (21) – С. 90–96.
6. Нехаев Н. Е. Определение кинематически возможного поля скоростей при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах / Н. Е. Нехаев, М. К. Измайлова, Е. В. Галицкий // *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. – 2010. – № 60. – С. 179–182.
7. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скорыходов, Б. М. Илюкович. – М. : Металлургия, 1972. – 352 с.

Измайлова М. К. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ;

Нехаев Н. Е. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru