

УДК 621.771.01

Измайлова М. К.
Нехаев Н. Е.
Степчук В. В.

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИ ВОЗМОЖНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ФЛАНЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

В последнее время широкое распространение получает производство сложных фасонных профилей (СФП) с применением четырехвалковых калибров, которые позволяют создавать обжатие практически по всему периметру профилей и тем самым гарантировать получение их формы и точных размеров [1]. Данные о практическом применении четырехвалковых калибров свидетельствуют о возможности и целесообразности их использования при горячей прокатке целого ряда сложных фланцевых профилей [1–3]. Многовалковые калибры позволяют интенсифицировать процесс формообразования СФП, сократить число фасонных пропусков, повысить точность конфигурации и расширить сортамент СФП, производимых горячей прокаткой.

Большое разнообразие конфигураций различных фасонных профилей приводит к значительным трудностям при решении вариационных задач по определению формоизменения и энергосиловых параметров. По каждой решаемой задаче приходится выбирать характерное только для данной задачи кинематически возможное поле скоростей и составлять вариационное уравнение. Вследствие этого постоянно предпринимаются попытки по объединению подобных по форме профилей в отдельные группы [1].

Целью работы является выбор кинематически возможного поля скоростей для целого класса фланцевых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах (рис. 1).

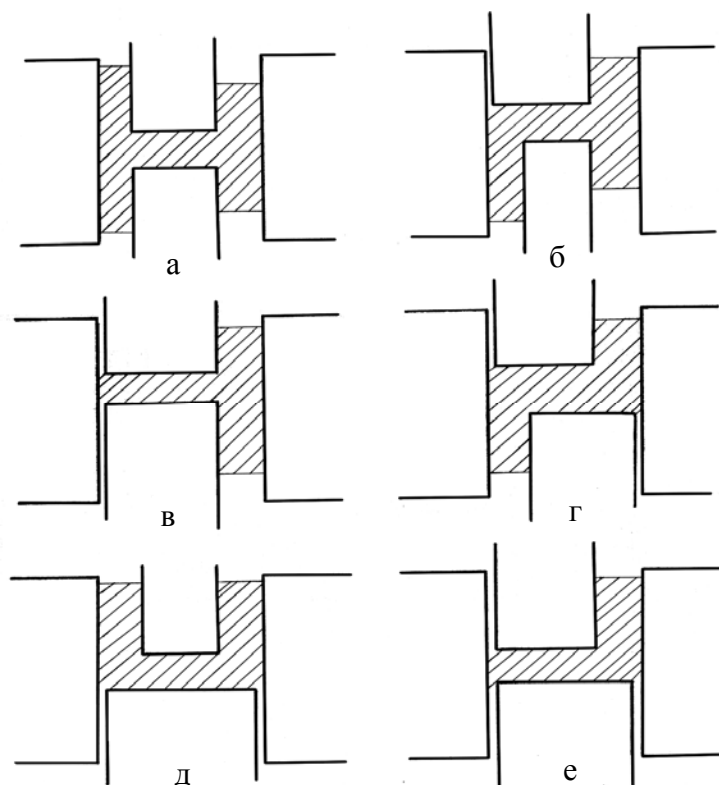


Рис. 1. Схемы расположения фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах: а – двутавровый профиль; б – тавровый профиль с ребром жесткости; в – тавровый профиль; г – зетовый профиль; д – швеллер; е – угловой профиль

Деформация металла осуществляется горизонтальными и вертикальными валками.

Профили двутавра и швеллера можно считать характерными для всего класса фланцевых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах. Эти профили содержат все типовые участки, из комбинации которых можно составить все остальные профили: тавровые симметричные и асимметричные профили, зетообразную сталь и угловые профили.

Таким образом, можно предложить и разработать универсальную методику, основанную на составлении кинематически возможного поля скоростей для четырех типовых участков 1, 2, 3 и 4, которые представлены на рис. 2. Все фланцевые профили могут быть составлены из этих участков или их части. Например, профиль швеллера включает участки 1, 3 и 4, а двутавровой балки – участки 1, 2 и 4. Стыковка участков и удовлетворение граничным условиям должны конкретизироваться для каждого отдельного профиля.

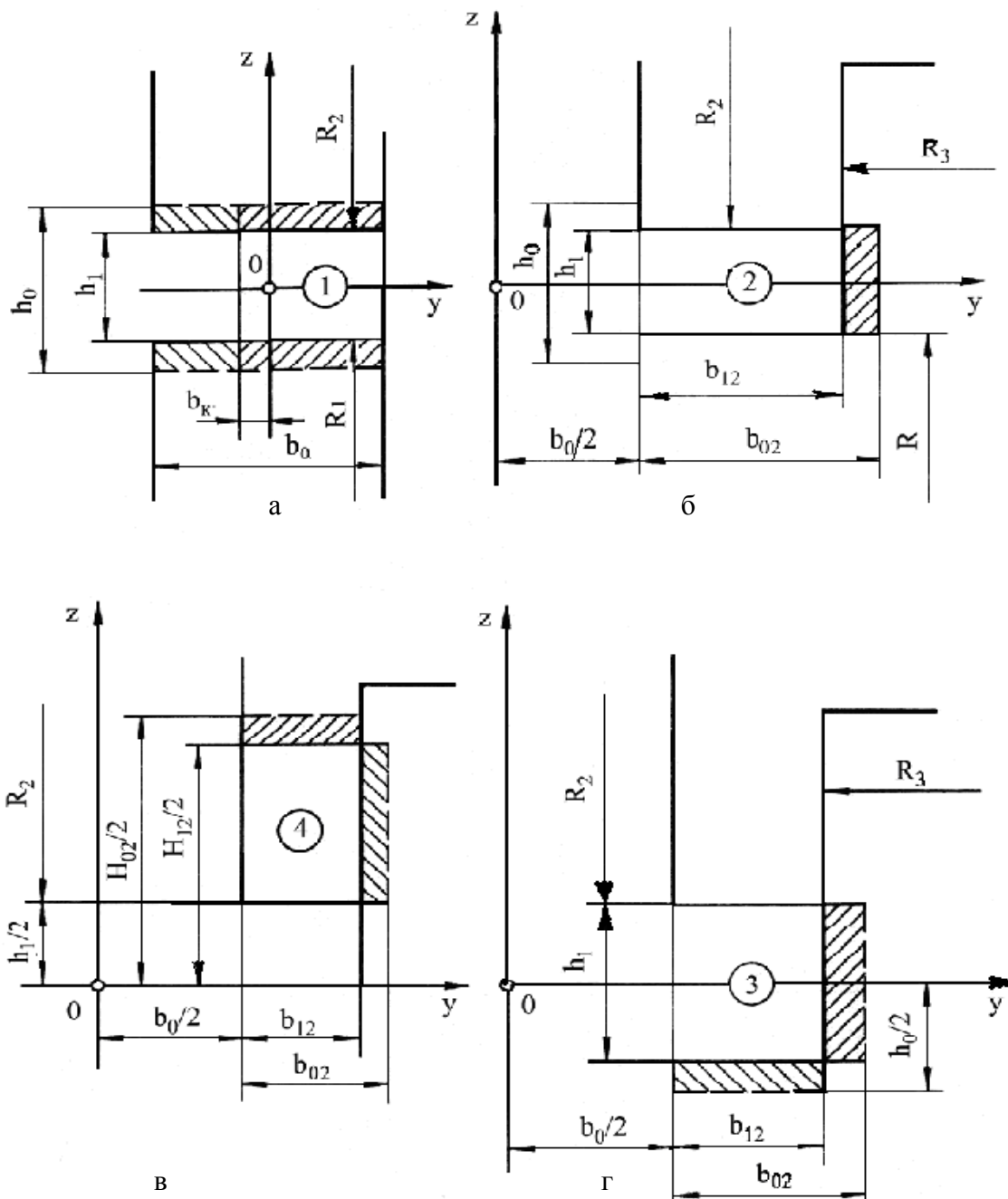


Рис. 2. Типовые участки 1...4 при прокатке фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах

Из рассмотрения типовых участков (рис. 2) следует, что участок 1 деформируется непосредственно валками и является активным участком. Участок 1 разделен при свободном уширении критическим сечением b_k (рис. 2, а), которое является границей раздела течения металла в поперечном направлении.

Участок 2 (рис. 2, б) 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.

Участок 3 (рис. 2, г) по существу также как и участок 2 является переходным участком. Однако участок 3 обжимается с двух сторон – горизонтальным валком с обжатием $0,5(h_0 - h_1)$ и вертикальным валком с обжатием $b_{02} - b_{12}$. Кроме того, в участок 3 перетекает в поперечном направлении металл из участка 1. Поэтому, участок 3 можно считать полу-активным участком.

Участок 4 (рис. 2, в) деформируется за счет проволакивания его между поверхностями горизонтального и вертикального валков. При этом вертикальный валок является неприводным валком. Если же вертикальные валки – приводные, то участок 4 представляет собой активный участок.

Кинематически возможное поле скоростей выбираем для типовых участков 1...4 (рис. 2).

Полагаем, что вертикальные валки являются неприводными, деформируемая среда – несжимаемая. 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 валка:

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

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, 3 и 4 (вертикальный валок):

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

Выбор поля скоростей начинаем с компоненты v_x , общей для всех участков. Для повышения точности решения задачи рассматриваем пространственное течение металла, в отличие от принятой в работе [4] гипотезы плоских сечений. При этом задаем v_x в виде полинома пятой степени по x :

$$v_x = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4(y - b_k)^2 + A_5x^5z^2, \quad (5)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ – неизвестные коэффициенты, часть из которых определяется из граничных условий, а остальные из решения вариационного уравнения.

Граничные условия для скорости v_x :

$$\left. \begin{aligned} v_x|_{x=0} = -v_1, \quad v_x|_{x=l} = -v_0, \\ \frac{\partial v_x}{\partial x}|_{x=0} = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}|_{x=0} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где v_1 – скорость выхода полосы из валков; v_0 – скорость полосы при $x = l$.

Удовлетворяя граничным условиям (6) и переходя к безразмерным варьируемым параметрам a_2, a_3 , получим из (5):

$$v_x = -a_1 v_6 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \frac{x^3}{l^3} + a_2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 \left(1 - \frac{x}{l}\right) \left(\frac{y - b_k}{b_0}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{l}\right)^3 \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) \left(\frac{z}{h_0}\right)^2 \right], \quad (7)$$

где v_6 – окружная скорость валков;

$$a_1 = \frac{v_1}{v_6} \quad \text{– коэффициент опережения};$$

$$\lambda = \frac{v_1}{v_0} \quad \text{– коэффициент вытяжки}.$$

Определим поле скоростей на участках 1...4. При определении кинематически возможного поля скоростей необходимо удовлетворить [5]

условию несжимаемости:

$$\xi_x + \xi_y + \xi_z = 0, \quad (8)$$

$$\text{где } \xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости \vec{v} частиц металла в очаге деформации;

условию непроницаемости при $\frac{\partial F}{\partial y} = 0$:

$$v_{zk} = v_{xk} \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (9)$$

где k – индекс контактной поверхности;

$F = F(x)$ – уравнение поверхности валка.

Участок 1 (рис. 2, а). Скорость вертикального перемещения в соответствии с [5] равна:

$$v_{z1} = \frac{v_{zk2}}{F_{z2}} z. \quad (10)$$

Скорость v_{zk2} определяется из условия непроницаемости (9).

Условие несжимаемости (8) для участка 1 имеет вид:

$$\frac{\partial v_{y1}}{\partial y} + \frac{1}{F_{z2}} v_{xk} \frac{\partial F_{z2}}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x}. \quad (11)$$

Решение этого дифференциального уравнения:

$$v_{y1} = \frac{1}{F_{z2}} \left[C_2 - \int_0^y \left(v_{xk} \frac{\partial F_{z2}}{\partial x} + F_{z2} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) dy \right]. \quad (12)$$

Граничные условия:

при свободном уширении участка 1:

$$v_{y1} \Big|_{y=b_k} = 0;$$

при полном ограничении уширения участка 1:

$$v_{y1} \Big|_{y=-0,5b_0} = 0.$$

Участок 2 (рис. 2, б). Задавая v_{y2} в виде:

$$v_{y2} = B_0 + B_1 y \quad (13)$$

и удовлетворяя граничным условиям:

при $y = 0,5b_0$: $v_{y2} = v_{y1}$;

при $y = F_{y3}$: $v_{y2} = v_{yk3}$,

где v_{yk3} – поперечная компонента скорости на контактной поверхности F_{y3} , находим:

$$v_{y2} = v_{y1}^* - \frac{v_{yk3} - v_{y1}^*}{F_{y3} - 0,5b_0} (y - 0,5b_0); \quad (14)$$

здесь $v_{y1}^* = v_{y1} \Big|_{y=0,5b_0}$; $v_{yk3} = v_{xk3} \frac{\partial F_{y3}}{\partial x}$; v_{xk3} определяется из (7) при $y = F_{y3}$.

Из условия несжимаемости (8) с учетом граничного условия $v_{z2} = 0$ при $z = 0$ находим:

$$v_{z2} = - \int \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y2}}{\partial y} \right) dz. \quad (15)$$

Участок 3 (рис. 2, г). Скорость поперечного перемещения v_{y3} определяется аналогично v_{y2} , т. е. $v_{y3} = v_{y2}$. Из условия несжимаемости (8):

$$v_{z3} = - \int \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y3}}{\partial y} \right) dz + \varphi(x, y). \quad (16)$$

Граничные условия:

при $z = F_{z1}$: $v_{z3} = v_{zk1}$,

при $z = F_{z2}$: $v_{z3} = v_{zk2}$.

Участок 4 (рис. 2, в). Задаем компоненту v_{y4} аналогично v_{y2} и v_{y3} в виде ряда (13).

Удовлетворяя граничным условиям:

при $y = 0,5b_0$: $v_{y4} = 0$,

при $y = F_{y3}$: $v_{y4} = v_{yk3}$, находим:

$$v_{y4} = \frac{v_{yk3}}{F_{y3} - 0,5b_0} (y - 0,5b_0). \quad (17)$$

Тогда из условия несжимаемости:

$$v_{z4} = -\int \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y4}}{\partial y} \right) dz + \varphi(x, y). \quad (18)$$

Если участок 4 стыкуется с участком 2, то имеем следующее граничное условие для определения $\varphi(x, y)$:

при $z = F_{z2}$: $v_{z4} = v_{z2}$, если же стыкуется участок 4 с участком 3, то:

при $z = F_{z2}$: $v_{z4} = v_{z3}$.

Таким образом, нами определены кинематически возможные поля скоростей для типовых участков при прокатке фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах.

Полученные поля скоростей предназначены для решения вариационной задачи и определения формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке фланцевых профилей.

ВЫВОДЫ

Предложена единая методика выбора кинематически возможного поля скоростей при прокатке целого класса фланцевых профилей в четырех валковых калибрах. Для повышения точности решения задачи рассмотрено пространственное течение металла. Поле скоростей представлено для четырех типовых участков, из комбинации которых получают всевозможные фланцевые профили как симметричные, так и асимметричные. Стыковка участков и удовлетворение граничным условиям конкретизируются для каждого отдельного профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочное издание в 6 т. Т. 1. / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : РИИ «Днепр-ВАЛ», 2002. – 518 с.
2. Тубольцев А. Г. Опыт и проблемы применения кассет конструкции ДМетИ с неприводными вертикальными валками 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. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович. – М. : Металлургия, 1972. – 352 с.

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

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

Степчук В. В. – магистр ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: omd@dstu.dp.ua