

УДК 621.771.01

М. К. ИЗМАЙЛОВА, канд. техн. наук, доц., ДГТУ, Днепродзержинск,
А. Н. ЧУБ, магистрант, ДГТУ, Днепродзержинск.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ

Рассмотрена кинематика очага деформации, сделан выбор кинематически возможного поля скоростей, получен функционал мощностей вариационной задачи при прокатке тавровых профилей в четырехвалковых калибрах с приводными горизонтальными и неприводными вертикальными валками. При выборе поля скоростей использованы гипотеза плоских сечений, условие несжимаемости и условие непроницаемости. Предложенный алгоритм реализован на ПЭВМ.

Ключевые слова: прокатка, очаг деформации, кинематически возможное поле скоростей, формоизменение, четырехвалковый калибр, тавровые профили.

Введение. Четырехвалковые калибры (ЧВК) позволяют интенсифицировать процесс формообразования сложных фасонных профилей, расширить их сортамент, сократить число фасонных пропусков и повысить точность конфигурации [1, 2]. Однако, несмотря на явные преимущества, четырехвалковые калибры еще не находят достаточно широкого применения при прокатке целого ряда фланцевых профилей из-за проблемы качественного их заполнения. Для этого необходимо правильно рассчитывать формоизменения металла.

Одним из универсальных 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 [3,4]. 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.

Целью данной работы является определение формоизменения для тавровых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах (рис.).

Ввиду симметрии относительно продольно-горизонтальной плоскости рассматриваем $\frac{1}{2}$ часть очага деформации. Деформация металла осуществляется горизонтальными приводными и вертикальными неприводными валками. Очаг деформации (рис.) разделен на три характерных участка. Участок 1 деформируется непосредственно валками и является активным участком. 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. Участок 4 деформируется за счет пролакивания его между поверхностями горизонтального и вертикального валков.

При исследовании кинематики очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковых калибрах для компонент поля скоростей V_x , V_y , V_z используем [5] гипотезу плоских сечений, условие несжимаемости для скоростей относительных удлинений и модель жёсткопластической среды. Принимаем правую систему координат. Ось Ox направлена против хода прокатки.

© М. К. Измайлова, А. Н. Чуб, 2012

Уравнение поверхности верхнего горизонтального валка ($R_1 = R_2 = R$)

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

Уравнение поверхности правого вертикального валка

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

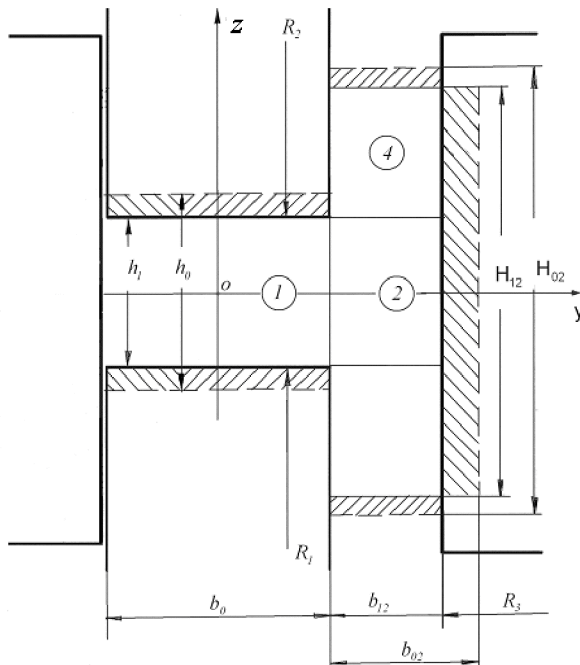


Рис. – Схема очага деформации при прокатке тавровых профилей в четырёхвалковом калибре

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)

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

Кинематически возможное поле скоростей перемещений имеет вид:

скорость продольного перемещения v_x , которая одинакова для всех участков

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

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 $x = l$, скорость вертикального перемещения на участке 1

$$v_{z1} = \frac{v_x}{F_z} \cdot \frac{x}{\sqrt{R_2^2 - x^2}} z; \quad (6)$$

скорость поперечного перемещения v_{y_1} на участке 1

$$v_{y_1} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{z_1}}{\partial z}\right)(y + 0,5b_0) \quad (7)$$

скорость поперечного перемещения v_{y_2} на участке 2

$$v_{y_2} = v_{y_1}^* + \frac{v_{y_{k_3}} - v_{y_1}^*}{F_y - 0,5b_0}(y - 0,5b_0), \quad (8)$$

здесь $v_{y_1}^* = v_{y_1}|_{y=0,5b_0}$; $v_{y_{k_3}} = v_x \frac{x}{\sqrt{R_3^2 - x^2}}$,

скорость вертикального перемещения на участке 2

$$v_{z_2} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_{y_{k_3}} - v_{y_1}^*}{F_y - 0,5b_0}\right)z, \quad (9)$$

скорость поперечного перемещения v_{y_4} на участке 4

$$v_{y_4} = \frac{v_{y_{k_3}}}{F_y - 0,5b_0}(y - 0,5b_0), \quad (10)$$

вертикальная составляющая скорости на участке 4

$$v_{z_4} = v_{z_2}|_{z=F_z} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_{y_4}}{\partial y}\right)(F_z - z), \quad (11)$$

Для определения формоизменения и энергосиловых параметров используем вариационное уравнение для жесткопластической среды [5].

Для получения функционала мощностей вариационной задачи необходимо вычислить сумму мощностей всех сопротивлений деформации. В эту мощность N войдут мощности деформации (внутренних сил), срезов на границах разделов участков и зон и сил трения на скоростях скольжения.

Мощность внутренних сил на участке 1

$$N_{\text{вн}} = \tau_s \int_0^l \int_{-0,5b_0}^{0,5b_0} \int_0^{F_z} H_1 dx dy dz + \tau_s \int_0^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_y} \int_0^{F_z} H_2 dx dy dz + \tau_s \int_0^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_y} \int_{F_z}^{F_H} H_4 dx dy dz. \quad (12)$$

где H_i – интенсивность скоростей деформации сдвига на участках 1, 2 и 4;

F_H – уравнение торцевой поверхности правой полки, которое аппроксимируется линейной функцией;

$$F_H = 0,5H_{02} + 0,5(H_{12} - H_{02})\frac{x}{l_3}; \quad H_{02} = \frac{b_0(h_0 - \lambda h_1) + b_{02}(H_{12} + h_0) - h_1 b_{12} \lambda}{\lambda b_{12}}.$$

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 1

$$N_{\text{тр}_1} = \psi \tau_s \int_0^l \int_{-0,5b_0}^{0,5b_0} \sqrt{(v_x - v_{\text{ex}})^2 + v_{y_1}^2 + (v_{z_1} - v_{\text{ez}})^2} \Big|_{z=F_z} \frac{dx dy}{\cos(n, z)}, \quad (13)$$

где v_{ex} , v_{ez} – составляющие окружной скорости горизонтальных валков;

$$v_{ex} = -v_e \cos(n, z); v_{ez} = v_{ex} \frac{\partial F_z}{\partial x}; \cos(n, z) = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial F_z}{\partial x}\right)^2};$$

ψ – коэффициент развития контактных напряжений на участке 1.

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 2

$$N_{тр2} = \psi_1 \tau_s \int_0^{l_3 F_z} \int_0^{F_y} \sqrt{(v_x - v_{ex1})^2 + (v_{y2} - v_{ey1})^2 + v_{z2}^2} \Big|_{z=F_y} \frac{dxdy}{\cos(n, y)}, \quad (14)$$

где v_{ex1}, v_{ey1} – составляющие окружной скорости вертикальных валков;

$$v_{ex1} = -v_{e3} \cos(n, y); v_{ey1} = v_{ex1} \frac{\partial F_y}{\partial x}; \cos(n, y) = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x}\right)^2};$$

ψ_1 – коэффициент развития контактных напряжений на вертикальных валках.

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 4

$$N_{тр4} = \psi_1 \tau_s \int_0^{l_3 F_H} \int_{F_z} \sqrt{(v_x - v_{ex1})^2 + (v_{y4} - v_{ey1})^2 + v_{z4}^2} \Big|_{z=F_y} \frac{dxdy}{\cos(n, y)}, \quad (15)$$

Мощность сил трения на боковой поверхности верхнего горизонтального валка участка 4

$$N_{тр4б} = \psi \tau_s \int_0^{l_3 F_H} \int_{F_z} \sqrt{(v_x - v_{ex2})^2 + v_{y4}^2 + (v_{z4} - v_{ez2})^2} \Big|_{y=0,5b_0} dx dz, \quad (16)$$

где $v_{ex2} = -\frac{v_e}{R}(R + 0,5h_1 - z); v_{ez2} = -v_e \frac{x}{R}$.

Мощности сил среза на входе полосы в валки:

$$N_{ср} = \tau_s \int_{-0,5b_0}^{0,5b_0} \int_0^{0,5h_0} \sqrt{v_{y1}^2 + v_{z1}^2} \Big|_{x=l} dy dz + \tau_s \int_{0,5b_0}^{b_{02}} \int_0^{0,5h_0} \sqrt{v_{y2}^2 + v_{z2}^2} \Big|_{x=l_3} dy dz + \tau_s \int_{0,5b_0}^{b_{02}} \int_{0,5h_0}^{0,5H_{12}} \sqrt{v_{y4}^2 + v_{z4}^2} \Big|_{x=l_3} dy dz; \quad (17)$$

Мощности сил среза между участками 1 и 2 и участками 2 и 4

$$N_{ср_{уч}} = \tau_s \int_0^l \int_0^{F_z} \|v_{z1} - v_{z2}\|_{y=0,5b_0} dy dz + \tau_s \int_{0,5b_0}^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_y} \|v_{y2} - v_{y4}\|_{z=F_z} dx dy. \quad (18)$$

Вариационная задача сводится к поиску минимума функционала

$$N = N_{en} + N_{тр1} + N_{тр2} + N_{тр4} + N_{тр4б} + N_{ср} + N_{ср_{уч}}. \quad (19)$$

Варьируемыми параметрами, подлежащими определению при решении вариационной задачи, являются коэффициенты вытяжки λ и опережения a_1 .

Представленный алгоритм реализован на ПЭВМ.

С целью проверки теоретического решения проведено сравнение с экспериментальными данными по прокатке полос таврового сечения в четырехвалковых калибрах на полупромышленном стане 300 ДГТУ. Каждый из четырехвалковых калибров образован двумя приводными горизонтальными валками диаметром 320 мм и двумя вертикальными не-приводными валками кассеты диаметром 190 мм. Нагрев заготовок из стали марки Ст.3

производилась до температуры 1015...1030°C в электрической печи. Скорость прокатки 0,5 м/с. Материал валков – сталь 45X. Длина образцов 300 мм.

Сравнение опытных и расчетных данных проводилось по коэффициенту вытяжки. В таблице приведены исходные данные по прокатке тавровых профилей в четырехвалковых калибрах, опытные $\lambda_{он}$, а также расчетные значения коэффициента вытяжки $\lambda_{расч}$, найденные при решении вариационной задачи на ПЭВМ. Достигнутая точность расчетов позволяет использовать рассмотренную методику при проведении технологических расчетов.

Таблица. Опытные и расчетные значения технологических параметров

h_0 ,мм	h_1 ,мм	b_0 ,мм	b_{02} ,мм	b_{12} ,мм	H_{12} ,мм	$\lambda_{он}$	$\lambda_{расч}$
18	13	14,3	18	13	27	1,219	1,204
18	13	7,3	15	13	27	1,119	1,123
15	13	4,0	18	13	27	1,167	1,152
15	13	18	15	13	27	1,105	1,114
18	11	14,5	18	13	27	1,246	1,255
15	11	18	15	13	27	1,113	1,121
18	11	17	15	11	21	1,353	1,367
15	11	14,5	18	11	21	1,280	1,268

Вывод. Рассмотрено определение формоизменения при прокатке тавровых профилей в четырёхвалковых калибрах на основе вариационных принципов. Достигнутая точность расчетов позволяет использовать рассмотренную методику при проведении технологических расчетов.

Список литературы: 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. *Огинский И.К.* Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров / И.К. Огинский, В.Н. Данченко, А.А. Самсоненко, В.В. Бояркин. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 355 с. 3. *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. 4. *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. 5. *Тарновский И.Я.* Элементы теории прокатки сложных профилей / И.Я. Тарновский, А.Н. Скороходов, Б.М. Илюкович – М.: Металлургия, 1972. – 352 с.

Надійшла до редколегії 19.10.2012

УДК 621.771.01

Определение формоизменения при прокатке тавровых профилей в четырехвалковых калибрах на основе вариационных принципов / Измайлова М.К., Чуб А.Н.// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). С. 121-125. Библиогр.: 5 назв.

Розглянута кінематика осередку деформації, зроблений вибір кінематично можливого поля швидкостей, отриманий функціонал потужностей варіаційної задачі при прокатуванні таврових профілів в чотирьохвалкових калібрах з приводними горизонтальними і неприводними вертикальними валками. При виборі поля швидкостей використані гіпотеза плоских перетинів, умова нестисливості і умова непроникності. Запропонований алгоритм реалізований на ПЕОМ.

Ключові слова: прокатка, осередок деформації, кінематично можливе поле швидкостей, формозміна, чотирьохвалковий калібр, таврові профілі.

We consider the kinematics of the zone of deformation, made the choice of cinematically of a the possible field of speeds, obtained by the functional capacity of the variational problem at rolling of the T-section profiles in four-roll passes with driving horizontal and without a drive vertical rolls. At a choice of a field of speeds the hypothesis of plane sections, a condition of not compression and a condition of tightness are used. The proposed algorithm is implemented on the PC.

Key words: rolling, the zone of deformation, the cinematically a possible field of speeds, the forming of metal, four-roll pass, the T-section profiles.