

УДК 621.771.01

Измайлова М. К.
Нехаев Н. Е.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ**

Прокатка в четырехвалковых калибрах (ЧВК) привлекает внимание специалистов возможностью получения сложных фасонных профилей повышенной точности, а также возможностью прокатки труднодеформируемых металлов и сплавов [1, 2]. Благоприятные условия деформации (всестороннее обжатие, большая вытяжка) в ЧВК дают возможность уменьшить число фасонных калибров на станах в полтора – два раза по сравнению с двухвалковыми [1].

Анализ сортамента фасонных профилей [1] показывает, что около 15 % профилей целесообразно получать прокаткой в клетях с четырехвалковым калибром. Данные о практическом применении ЧВК свидетельствуют о возможности и целесообразности их использования при горячей прокатке целого ряда сложных профилей П-образной формы, двутавровой, тавровой, крестообразной и других форм [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 формоизменение 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 зетобразные. 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.

Кинематически возможное поле скоростей при прокатке в четырехвалковых калибрах швеллерных профилей представлено в работе [5], а при прокатке двутавровых профилей – в работе [6].

Целью данной работы является определение формоизменения для двутавровых профилей, прокатываемых в четырехвалковых калибрах (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 [6].

Участок 1 разделен при свободном уширении критическим сечением b_k , которое является границей раздела течения металла в поперечном направлении.

При исследовании кинематики очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых 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.

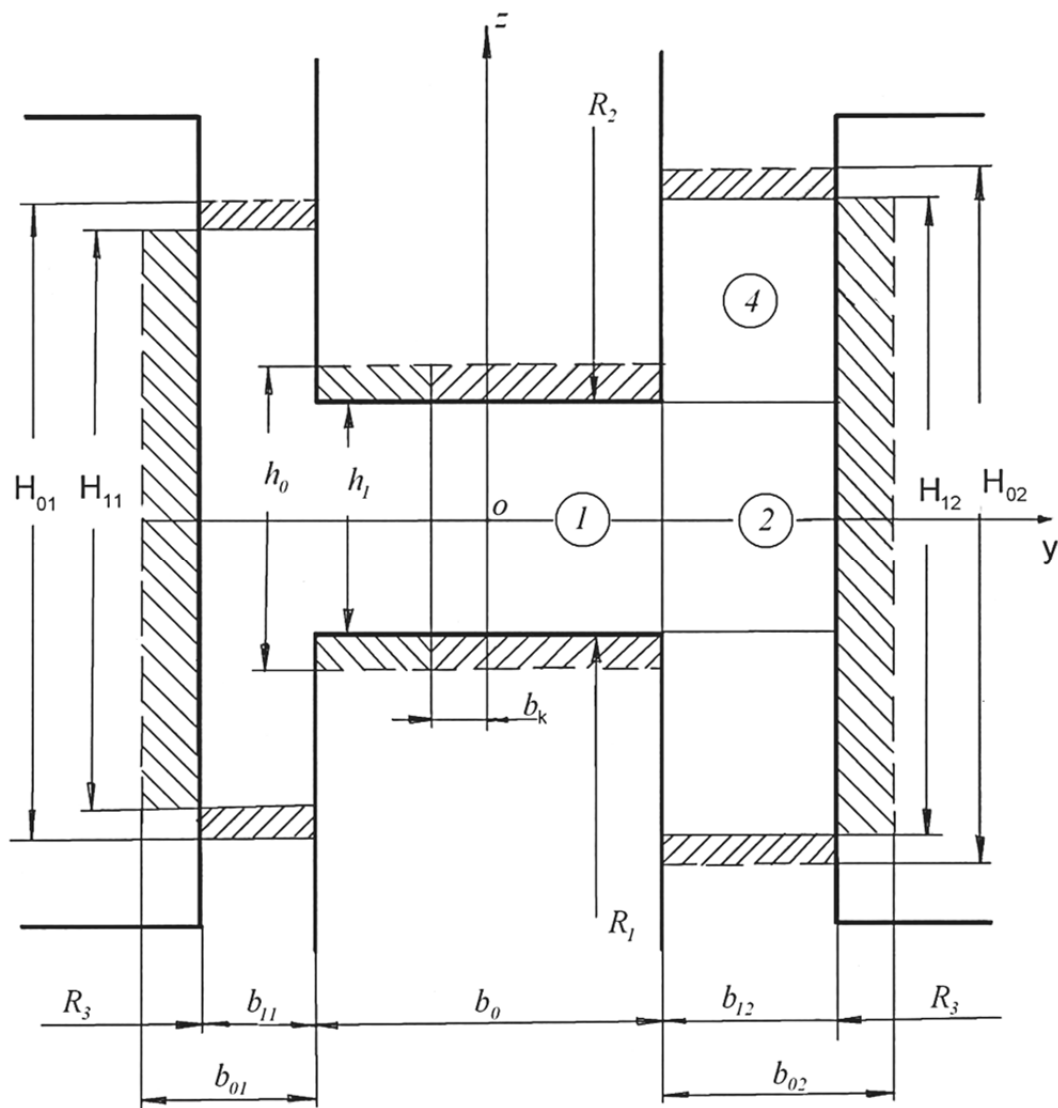


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковом калибре

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 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 [6]:

– скорость продольного перемещения v_x , которая одинакова для всех участков:

$$v_x = -a_1 v_6 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right], \quad (5)$$

где v_6 – окружная скорость горизонтальных валков;

$a_1 = \frac{v_1}{v_6}$ – 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:

$$v_{z_1} = \frac{v_x}{F_{z_2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{R_2^2 - x^2}} z; \quad (6)$$

– скорость поперечного перемещения v_{y_1} на участке 1:

$$v_{y_1} = -(\xi_x + \xi_{z_1})(y - b_k), \quad (7)$$

где $\xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = 3v_6 a_1 \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^2}{l^3}$; $\xi_{z_1} = \frac{v_x}{F_{z_2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{R_2^2 - x^2}}$;

– скорость поперечного перемещения v_{y_2} на участке 2:

$$v_{y_2} = v_{y_1}^* + \frac{v_{y_{k3}} - v_{y_1}^*}{F_{y_3} - 0,5b_0} (y - 0,5b_0), \quad (8)$$

здесь $v_{y_1}^* = v_{y_1} \Big|_{y=0,5b_0}$; $v_{y_{k3}} = v_x \frac{x}{\sqrt{R_3^2 - x^2}}$;

– скорость вертикального перемещения на участке 2:

$$v_{z_2} = - \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_{y_{k3}} - v_{y_1}^*}{F_{y_3} - 0,5b_0} \right) z; \quad (9)$$

– скорость поперечного перемещения v_{y_4} на участке 4:

$$v_{y_4} = \frac{v_{y_{k3}}}{F_{y_3} - 0,5b_0} (y - 0,5b_0), \quad (10)$$

– вертикальная составляющая скорости на участке 4:

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

здесь $\frac{\partial v_{y_4}}{\partial y} = \frac{v_{y_{k3}}}{F_{y_3} - 0,5b_0}$.

Для определения формоизменения и энергосиловых параметров используем вариационное уравнение для жесткопластической среды [7]:

$$\delta \left\{ \iiint_V \tau_s H dV + \iint_{S_{cp}} \tau_s [v] dS + \iint_{S_\sigma} |\vec{\tau}_k| \|\vec{v}_k - \vec{v}_b\| dS \right\} = 0. \quad (12)$$

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:

$$N_1 = \tau_s \int_0^{l_3} \int_0^{F_{y3}} \int_0^{F_{z2}} H_1 dx dy dz, \quad (13)$$

где H_1 – интенсивность скоростей деформации сдвига на участке 1.

Мощность внутренних сил на участке 2:

$$N_2 = \tau_s \int_0^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_{y3}} \int_0^{F_{z2}} H_2 dx dy dz, \quad (14)$$

где H_2 – интенсивность скоростей деформации сдвига на участке 2.

Мощность внутренних сил на участке 4:

$$N_4 = \tau_s \int_0^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_{y3}} \int_{F_{z2}}^{F_{H1}} H_4 dx dy dz, \quad (15)$$

где H_4 – интенсивность скоростей деформации сдвига на участке 4;

F_{H1} – уравнение торцевой поверхности правой полки, которое аппроксимируется линейной функцией:

$$F_{H1} = 0,5H_{02} + 0,5(H_{12} - H_{02}) \frac{x}{l_3}.$$

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 1:

$$N_{тр1} = \psi \tau_s \int_0^{l_3} \int_0^{0,5b_0} \sqrt{(v_x - v_{bx})^2 + v_{y1}^2 + (v_{z1} - v_{bz})^2} \Big|_{z=F_{z2}} \frac{dx dy}{\cos(n, z)}, \quad (16)$$

где ψ – коэффициент развития контактных напряжений на участке 1;

v_{bx} , v_{bz} – составляющие окружной скорости горизонтальных валков:

$$v_{bx} = -v_b \cos(n, z); \quad v_{bz} = v_{bx} \frac{\partial F_{z2}}{\partial x}; \quad \cos(n, z) = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial F_{z2}}{\partial x} \right)^2}.$$

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 2:

$$N_{тр2} = \psi_1 \tau_s \int_0^{l_3} \int_0^{F_{z2}} \sqrt{(v_x - v_{bx1})^2 + (v_{y2} - v_{by1})^2 + v_{z2}^2} \Big|_{z=F_{y3}} \frac{dx dy}{\cos(n, y)}, \quad (17)$$

где ψ_1 – коэффициент развития контактных напряжений на вертикальных валках;

v_{bx1} , v_{by1} – составляющие окружной скорости вертикальных валков:

$$v_{bx_1} = -v_{b_3} \cos(n, y); \quad v_{by_1} = v_{bx_1} \frac{\partial F_{y_3}}{\partial x}; \quad \cos(n, y) = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial F_{y_3}}{\partial x} \right)^2}.$$

Мощность сил трения на скоростях скольжения на контактной поверхности участка 4:

$$N_{\text{тр}4} = \psi_1 \tau_s \int_0^{l_3} \int_{F_{z_2}}^{F_{H_1}} \sqrt{(v_x - v_{bx_1})^2 + (v_{y_4} - v_{by_1})^2 + v_{z_4}^2} \Big|_{z=F_{y_3}} \frac{dx dy}{\cos(n, y)}. \quad (18)$$

Мощность сил трения на боковой поверхности верхнего горизонтального вала участка 4:

$$N_{\text{тр}4b} = \psi \tau_s \int_0^{l_3} \int_{F_{z_2}}^{F_{H_1}} \sqrt{(v_x - v_{bx_2})^2 + v_{y_4}^2 + (v_{z_4} - v_{bz_2})^2} \Big|_{y=0,5b_0} dx dz, \quad (19)$$

где $v_{bx_2} = -\frac{v_b}{R} (R + 0,5h_1 - z)$; $v_{bz_2} = -v_b \frac{x}{R}$.

Мощности сил среза на входе полосы в валки:

– на участке 1:

$$N_{\text{ср}1} = \tau_s \int_0^{0,5b_0} \int_0^{0,5h_0} \sqrt{v_{y_1}^2 \Big|_{x=l} + v_{z_1}^2 \Big|_{x=l}} dy dz; \quad (20)$$

– на участке 2:

$$N_{\text{ср}2} = \tau_s \int_{0,5b_0}^{b_{02}} \int_0^{0,5h_0} \sqrt{v_{y_2}^2 \Big|_{x=l_3} + v_{z_2}^2 \Big|_{x=l_3}} dy dz; \quad (21)$$

– на участке 4:

$$N_{\text{ср}4} = \tau_s \int_{0,5b_0}^{b_{02}} \int_{0,5h_0}^{0,5H_{12}} \sqrt{v_{y_4}^2 \Big|_{x=l_3} + v_{z_4}^2 \Big|_{x=l_3}} dy dz. \quad (22)$$

Мощности сил среза между участками 1 и 2:

$$N_{\text{ср}1,2} = \tau_s \int_0^l \int_0^{F_{z_2}} \|v_{z_1} - v_{z_2}\|_{y=0,5b_0} dy dz; \quad (23)$$

– участками 2 и 4:

$$N_{\text{ср}2,4} = \tau_s \int_0^{l_3} \int_{0,5b_0}^{F_{y_3}} \|v_{y_2} - v_{y_4}\|_{z=F_{z_2}} dx dy. \quad (24)$$

Вариационная задача сводится к поиску минимума функционала:

$$N = N_1 + N_2 + N_4 + N_{\text{тр}1} + N_{\text{тр}2} + N_{\text{тр}4} + N_{\text{тр}4b} + N_{\text{ср}1} + N_{\text{ср}2} + N_{\text{ср}4} + N_{\text{ср}1,2} + N_{\text{ср}2,4}. \quad (25)$$

Варьируемыми параметрами, подлежащими определению при решении вариационной задачи, являются коэффициенты вытяжки λ , опережения a_1 и положение критического сечения b_k (рис. 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:

$$\delta = \frac{0,5b_0(h_0 - \lambda h_1) + b_{02}H_{02}}{\lambda b_{12}H_{02}}. \quad (26)$$

Представленный алгоритм реализован на ПЭВМ. Входными данными в программе являются независимые переменные:

$$m_1 = \frac{b_0}{R}; m_2 = \frac{b_{01}}{R_3}; m_3 = \frac{h_0}{R}; m_4 = \frac{h_0}{h_1}; m_5 = \frac{b_{01}}{b_{11}}; m_6 = \frac{H_{01}}{R_3}. \quad (27)$$

Область изменения факторов (27) определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} 0,13 \leq m_1 \leq 0,24; 0,16 \leq m_2 \leq 0,29; 0,043 \leq m_3 \leq 0,081; \\ 1,25 \leq m_4 \leq 1,8; 1,25 \leq m_5 \leq 1,8; 0,47 \leq m_6 \leq 0,78. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

В этой области был проведен численный эксперимент по определению значений параметров деформации с помощью разработанной программы. Вычисленные на ПЭВМ значения коэффициента вытяжки λ , а затем коэффициента утяжки δ по формуле (26) обработаны по методу множественной корреляции с использованием стандартного пакета прикладных программ «Статистика». В результате аппроксимации получена следующая формула для определения коэффициента утяжки:

$$\delta = 0,926 + 0,143m_1 + 0,344m_2 - 0,537m_3 - 0,0550m_4 + 0,124m_5 - 0,0964m_6. \quad (29)$$

Проверка адекватности зависимости (29) производилась по критерию Фишера. В результате статистического анализа зависимости (29) имеем: коэффициент множественной корреляции $R = 0,97$; средняя ошибка аппроксимации $\varepsilon = 2,47\%$; среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0,035$.

Наибольшее влияние на коэффициент утяжки δ оказывает параметр m_5 , затем – m_2 , далее m_4 и m_6 , наименьшее – m_3 и m_1 .

С увеличением m_1 , m_2 и m_5 коэффициент утяжки δ возрастает, а с ростом m_3 , m_4 и m_6 – уменьшается.

Статистический анализ показывает достаточно высокое соответствие опытных и расчетных данных. Таким образом, полученную формулу можно рекомендовать для расчетов коэффициентов формоизменения.

С целью проверки зависимости (29) проведены экспериментальные исследования по прокатке полос двутаврового сечения в универсальных калибрах на полупромышленном стане 300. Каждый из четырехвалковых калибров образован двумя приводными горизонтальными валками диаметром 320 мм и двумя вертикальными неприводными валками кассеты диаметром 90 мм.

Сравнение опытных и расчетных данных проводилось по коэффициенту вытяжки. Расчетное значение коэффициента вытяжки находилось из условия постоянства объема по формуле:

$$\lambda = \frac{0,5h_0b_0 + b_{02}H_{02}}{0,5h_1b_0 + \delta b_{12}H_{02}}. \quad (30)$$

Коэффициент утяжки δ вычислялся по формуле (29).

В табл. 1 приведены исходные данные по прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах, опытные $\lambda_{он}$, а также расчетные значения коэффициента вытяжки $\lambda_{расч1}$, найденные при решении вариационной задачи на ПЭВМ и расчетные значения коэффициента вытяжки $\lambda_{расч2}$, найденные по формуле (30). Достигнутая точность расчетов позволяет использовать рассмотренную методику при проведении технологических расчетов.

Таблица 1

Опытные и расчетные значения технологических параметров

h_0 , мм	h_1 , мм	b_0 , мм	b_{02} , мм	b_{12} , мм	H_{02} , мм	$\lambda_{оп}$	$\lambda_{расч1}$	$\lambda_{расч2}$
13,0	7,2	38,4	13,0	7,2	35,1	1,774	1,825	1,727
13,0	7,2	20,8	13,0	7,2	21,1	1,705	1,761	1,709
13,0	10,4	38,4	13,0	7,2	21,1	1,391	1,374	1,412
13,0	10,4	20,8	13,0	7,2	35,1	1,525	1,582	1,550
13,0	7,2	20,8	7,2	5,8	21,1	1,507	1,463	1,490
13,0	7,2	20,8	13,0	10,4	35,1	1,333	1,281	1,364
13,0	10,4	38,4	13,0	10,4	35,1	1,242	1,234	1,228
13,0	10,4	20,8	13,0	10,4	21,1	1,196	1,183	1,216
13,0	10,4	20,8	7,2	5,8	35,1	1,273	1,260	1,278
6,9	3,8	38,4	13,0	7,2	21,1	1,643	1,735	1,670
6,9	3,8	20,8	13,0	7,2	35,1	1,730	1,789	1,697
6,9	5,5	38,4	13,0	7,2	35,1	1,538	1,497	1,515
6,9	5,5	20,8	13,0	7,2	21,1	1,528	1,488	1,508
6,9	3,8	38,4	13,0	10,4	35,1	1,259	1,231	1,322
6,9	3,8	20,8	13,0	10,4	21,1	1,298	1,324	1,299
6,9	5,5	38,4	13,0	10,4	21,1	1,229	1,205	1,188
6,9	5,5	20,8	13,0	10,4	35,1	1,234	1,229	1,248

ВЫВОДЫ

Рассмотрено определение формоизменения при прокатке двутавровых профилей в четырёхвалковых калибрах на основе вариационных принципов. Получены формулы для определения коэффициентов формоизменения. Достигнутая точность расчетов позволяет использовать рассмотренную методику при проведении технологических расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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. *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 // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 90–96.*
5. 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. – (Серія «Машинобудування»).*
6. Измайлова М. К. *Определение кинематически возможного поля скоростей при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах / М. К. Измайлова, Н. Е. Нехаев // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 37–41.*
7. *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.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2012 г.