

УДК 621.771.01

Медведев В. С.

## ЕДИНЫЙ СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В СЛОЖНЫХ ФАСОННЫХ КАЛИБРАХ

В УкрГНТЦ «Энергосталь» разработан и реализован единый методологический и системный подход к решению задач пластического течения металла в сложных фасонных калибрах [1]. В основе этого подхода лежит представление профилей и формирующих их калибров как совокупности отдельных типовых базовых элементов. На этой основе созданы максимально унифицированные математические модели определения формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки и научно обоснованные методы расчета калибровок валков.

В результате анализа сортамента сложных фасонных профилей, способов их прокатки и калибровки выделено пять типовых базовых элементов калибров с различными граничными условиями на боковых кромках: полосовой-клиновой, угловой, пластовой тавровый, ребровой тавровый и крестообразный (рис. 1).

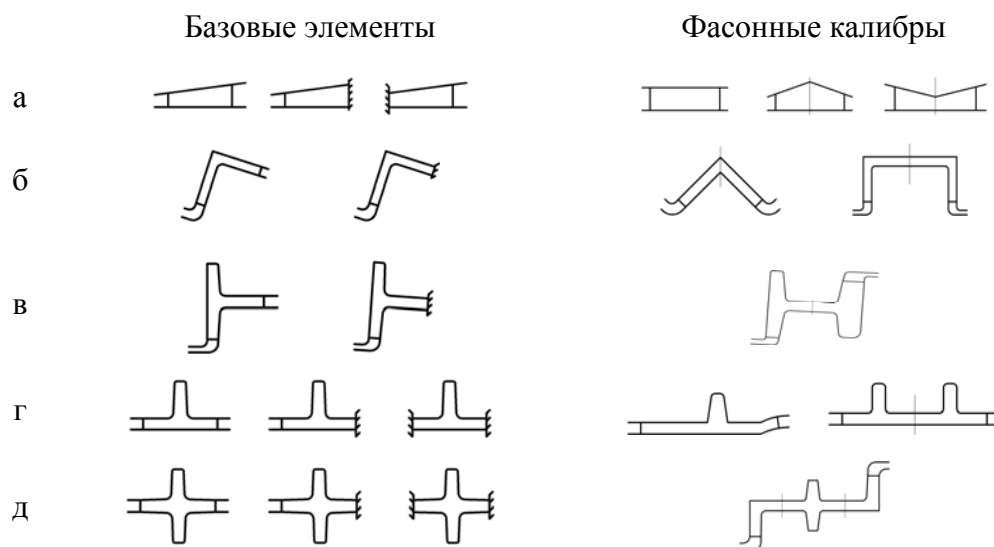


Рис. 1. Базовые элементы фасонных калибров:

а – полосовой-клиновой; б – угловой; в – пластовой тавровый; г – ребровой тавровый; д – крестообразный

подавляющее большинство фасонных профилей с развитой поверхностью формируются в трех базовых элементах – угловом, пластовом тавровом и ребровом тавровом. В настоящей статье изложены результаты теоретических исследований течения металла в этих трех базовых элементах калибров.

Целью исследований было математическое моделирование процессов прокатки в фасонных калибрах, выявление закономерностей течения металла, определение формоизменения и энергосиловых параметров прокатки. Исследование проведено с использованием методов, основанных на вариационных принципах механики сплошных сред [2–5].

Для упрощения задачи приняты следующие основные допущения: рассматривается только геометрический очаг деформации; внеконтактная деформация учитывается мощностью сил среза; деформация по высоте – равномерная; закон затухания функции скорости  $v_x$  вдоль очага деформации – параболический; металл является жесткопластической средой.

Для базовых элементов калибров построено универсальное кинематически возможное поле скоростей перемещений, определены скорости деформаций, интенсивность скоростей деформаций, деформации, мощность, силы и моменты прокатки.

Поле скоростей перемещений записывается в виде произвольных нелинейных функций  $v_{xj} = f_{xj}(x, y, z)$ ;  $v_{yj} = f_{yj}(x, y, z)$ ;  $v_{zj} = f_{zj}(x, y, z)$  с введением в них двух варьируемых параметров – коэффициента вытяжки  $\mu$  и коэффициента  $k$ , характеризующего положение поверхности раздела течения металла в поперечном направлении при свободном уширении стенки или полок.

Очаг деформации делится на  $j$ -участков (рис. 2–4). При их стыковке соблюдаются следующие граничные условия: сопряжение скоростей на каждом из стыков двух соседних участков; одинаковая вытяжка отдельных участков; условие постоянства объема.

Поле скоростей записывается следующими уравнениями:

– на прямых участках стенки и полок всех базовых элементов:

$$v_{z1} = -\frac{2v_6 x z}{HR}; \quad v_{x1} = v_6 \left[ \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \frac{x^2}{l^2} - 1 \right]; \quad v_{y1} = -2v_6 y x \left[ \frac{1}{l^2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) - \frac{1}{HR} \right] + C_1, \quad (1)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, которая для угловых, пластовых и ребровых тавровых элементов находится соответственно из условий:

$$v_{y1} \Big|_{y=0} = -k \frac{v_6 x}{R}; \quad v_{y1} \Big|_{y=0} = -k \frac{v_6 x}{R}; \quad v_{y1} \Big|_{y=b_n} = k \frac{v_6 x}{R}; \quad (2)$$

– на участке открытого фланца углового элемента:

$$v_{xj} = v_{x1}; \quad v_{yj} \Big|_{j=3,4,5} = -x \frac{v_6}{R} \frac{y - B_n}{F_{yj} - B_n} \sin \varphi \cos \varphi; \quad v_{y2} = \frac{v_{y1}}{b_0} (B_n - y); \quad (3)$$

– на участках открытого и закрытого фланцев пластового таврового элемента:

$$v_{xj} = v_{x1}; \quad v_{yj} \Big|_{j=2,4,6,8} = -x \frac{v_6}{R} \frac{y - B_n}{F_{yj} - B_n} \sin \varphi \cos \varphi; \quad v_{y5} = \frac{v_{y1}}{B - B_n} (B_n - y); \quad (4)$$

– на участках гребня ребрового таврового элемента:

$$v_{xj} = v_{x1}; \quad v_{yj} \Big|_{j=3,4,5} = -x y \frac{v_6}{R} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{F_{yj}}; \quad v_{y2} = \frac{v_{y1}}{b_0} y; \quad (5)$$

– на фланцах и гребне скорость  $v_{zj}$  находится из условия постоянства объема:

$$v_{zj} = -\int \left( \frac{\partial v_{xj}}{\partial x} + \frac{\partial v_{yj}}{\partial y} \right) dz + C_j. \quad (6)$$

Константы  $C_j$  определяются из соответствующих граничных условий.

Далее по известному полю скоростей определяются скорости деформаций  $\varepsilon_{xj}$ ,  $\varepsilon_{yj}$ ,  $\varepsilon_{zj}$ ,  $\varepsilon_{xyj}$ ,  $\varepsilon_{yzj}$ ,  $\varepsilon_{zxj}$  и интенсивность скоростей деформаций  $\varepsilon_{ij}$ .

Полная мощность прокатки:

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n N_{6n.j} + \sum_{j=1}^n N_{mp.j} + \sum_{j=1}^n N_{cp.j}. \quad (7)$$

Мощности внутренних сил и сил трения:

$$N_{вн.j} = \sigma_s \iiint_{V_j} \varepsilon_{ij} dV ; \tag{8}$$

$$N_{тр.j} = \psi \tau_s \iint_{F_j} v_{ск.j} dF , \tag{9}$$

где  $\psi$  – коэффициент, учитывающий зависимость сил трения от состояния трущихся поверхностей формы очага деформации.

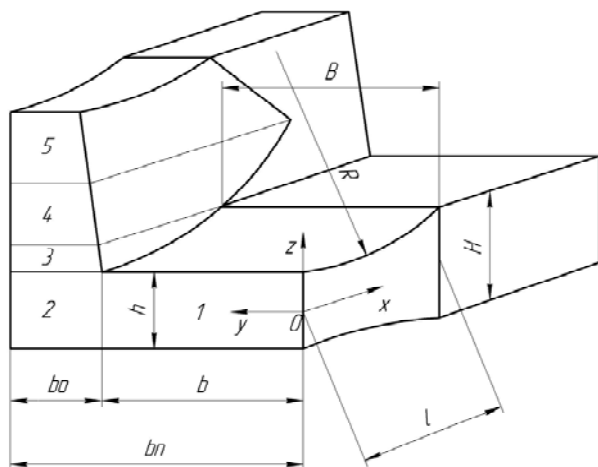


Рис. 2. Очаг деформации углового элемента

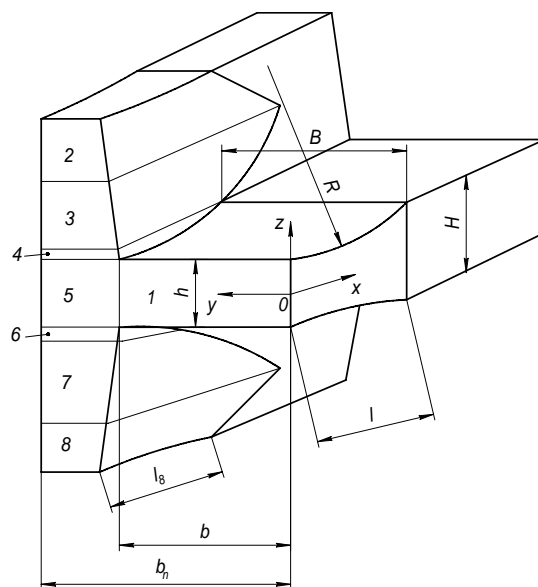


Рис. 3. Очаг деформации пластового таврового элемента

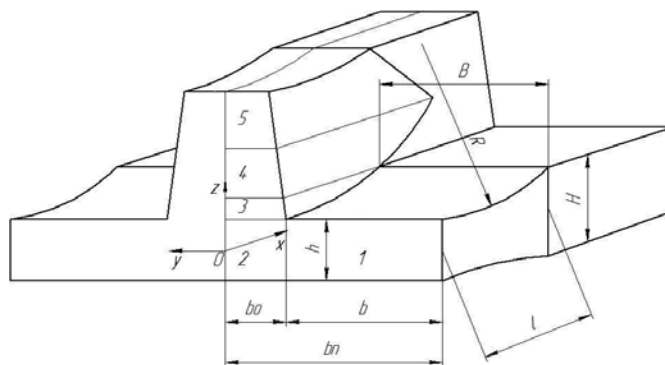


Рис. 4. Очаг деформации ребрового таврового элемента

Мощность сил среза, учитывающая скачкообразное изменение скорости  $v_{ср.}$  в направлении обжатий на входе в очаг деформации:

$$N_{ср.j} = \tau_s \iint_{F_j} v_{ср.j} dF , \tag{10}$$

где  $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$  – предел текучести при сдвиге (условие Мизеса).

Варьируемые параметры  $\mu$  и  $k$  определяются из условия минимума полной мощности  $\frac{\partial N_{\Sigma}}{\partial \mu} = 0; \frac{\partial N_{\Sigma}}{\partial k} = 0.$

Деформация металла (приращение или утяжка) на свободных поверхностях открытых фланцев и гребней, а также уширение стенки и полок (при  $k \neq 0$ ) в угловых, пластовых тавровых и ребровых тавровых элементах равны соответственно:

$$e_{zz5} = \int_0^{lx5} \frac{\varepsilon_{z5} \Big|_{z=+0,5H+ho}}{v_{x5} \Big|_{z=+0,5H+ho}} dx ; \quad (11)$$

$$e_{zz8} = \int_0^{l8} \frac{\varepsilon_{z8} \Big|_{z=0.5H+H\phi\phi}}{v_{x8} \Big|_{z=0.5H+H\phi\phi}} dx ; \quad (12)$$

$$e_{zz5} = \int_0^{lx5} \frac{\varepsilon_{z5} \Big|_{z=+0.5H+hz}}{v_{x5} \Big|_{z=+0.5H+hz}} dx ; \quad (13)$$

$$e_{yy1} = \int_0^{l1} \frac{\varepsilon_{y1} \Big|_{y=0}}{v_{x1} \Big|_{y=0}} dx ; \quad (14)$$

$$e_{yy1} = \int_0^l \frac{\varepsilon_{y1} \Big|_{y=Bn}}{v_{x1} \Big|_{y=Bn}} dx . \quad (15)$$

Момент и сила прокатки:

$$M = \frac{N_{\Sigma}}{V_{\sigma}} R ; \quad (16)$$

$$P = \sum_{j=1}^n P_j ; \quad (17)$$

$$P_j = \frac{N_{вн.j} + N_{мп.j} + N_{сп.j}}{\iint_{F_j} v_{zj}} . \quad (18)$$

Учитывая, что в сортаменте фасонных профилей имеется много фланцевых и гребневых профилей с переменной толщиной стенки или полок разработана обобщенная методика расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки в фасонных калибрах сложной формы. Эта методика основывается на гипотезе, которая была подтверждена специальным экспериментом, что неравномерность обжатия по ширине не влияет на их высотную деформацию фланцев и гребней [6]. По обобщенной методике формоизменение и энергосиловые параметры прокатки в фасонных калибрах с переменной толщиной стенки рассчитывают с учетом средней ее толщины, приведенной к единой ширине. Сложная действительная форма фасонных калибров приводится к более простой, состоящей из базовых элементов. Параметры прокатки сложного профиля определяются комплексно с учетом разнообразия сочетаемых элементов с постоянной или переменной толщиной стенок и полок и с учетом различных граничных условий на боковых кромках этих элементов (при ограничении уширения стенок или полок  $k = 0$ , при свободном уширении  $k \neq 0$ ).

Примеры приведения действительной формы калибров к базовой показаны на рис. 5.

После приведения действительной формы калибра к базовой с использованием разработанных математических моделей производится расчет высотной деформации  $\eta_h$  открытых фланцев и гребней, свободного уширения  $\beta$  стенок или полок, сил  $P$ , моментов  $M$  и мощности  $N$  прокатки по каждому  $n$ -му базовому элементу отдельно.

Сила, момент и мощность прокатки в калибре определяются как сумма их значений в каждом базовом элементе:

$$P = \sum_1^n P_n ; \quad (19)$$

$$M = \sum_1^n M_n ; \quad (20)$$

$$N = \sum_1^n N_n , \quad (21)$$

где  $n$  – число базовых элементов в данном калибре.

Расчет варьируемых параметров, формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки выполняется в среде MathCAD [7].

Сравнение результатов теоретических расчетов формоизменения и энергосиловых параметров прокатки с экспериментальными данными показало адекватность математических моделей реальным процессам (расхождение по формоизменению не более 12 %, по энергосиловым параметрам прокатки – не более 18 %).

В результате теоретического исследования процессов прокатки выявлены следующие новые закономерности течения металла в фасонных калибрах:

– увеличение бокового обжатия фланцев и гребней уменьшает приращение их высоты, а увеличение обжатия стенки или полка, наоборот, значительно увеличивает это приращение;

– увеличение защемления металла боковыми стенками калибров в открытых ручьях приводит к росту приращения высоты фланцев, а в закрытых ручьях, где формируются гребни, наоборот, уменьшает приращение их высоты;

– в узком очаге деформации по стенке или полкам приращение высоты фланцев или гребней больше, чем в широком;

– ограничение уширения стенки в узком очаге деформации увеличивает приращение высоты фланцев, а в широком очаге деформации, наоборот, уменьшает приращение.

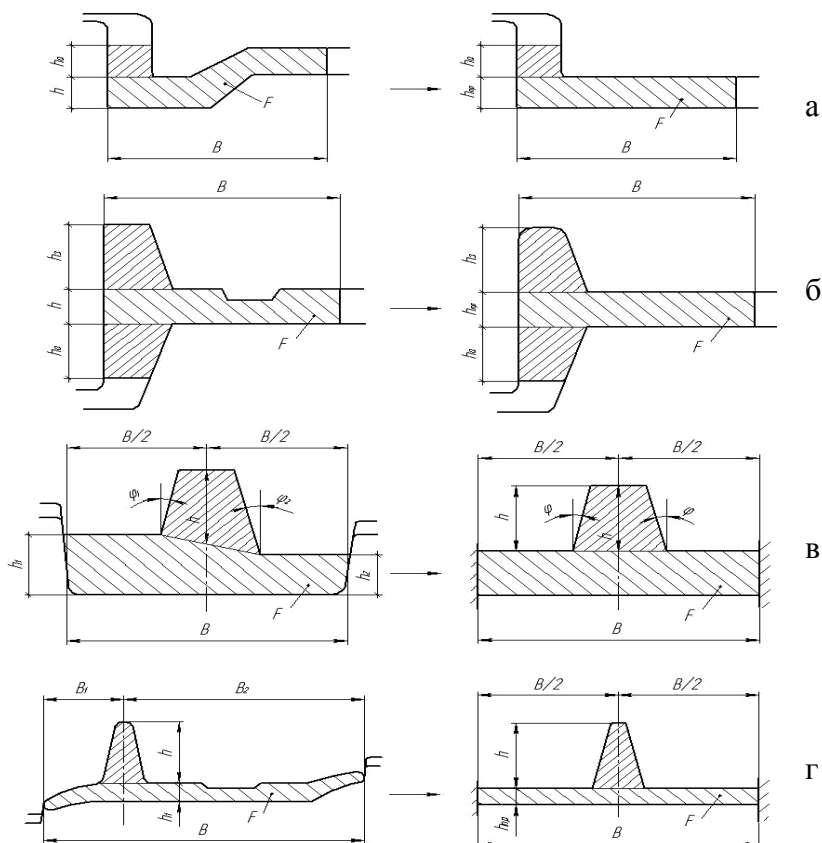


Рис. 5. Действительные (слева) и базовые (справа) калибры, состоящие из одного элемента: а – углового; б – плоского таврового; в, г – ребрового таврового

На базе выявленных закономерностей течения металла в фасонных калибрах разработаны новые рациональные способы прокатки и калибровки сложных фасонных профилей. В основу этих способов положены приемы глубокой разрезки заготовок в черновых калибрах, использование локальных обжатий в узких очагах деформации, небольших боковых деформаций по толщине фланцев и гребней, подгибка элементов и др. Это позволяет сократить число фасонных калибров, повысить универсальность калибровок, сократить расход прокатных валков, металла, энергоносителей.

Разработанные универсальные модели положены в основу математического обеспечения автоматизированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих технологий прокатки и калибровок валков экономичных фасонных профилей отраслевого и специального назначения и малотоннажных станов для их производства. В УкрГНТЦ «Энергосталь» разработана отраслевая САПР ТП «Сортовая прокатка», с помощью которой осуществляется разработка новых и совершенствование действующих технологий прокатки и калибровок валков.

## ВЫВОДЫ

Разработаны универсальные математические модели определения формоизменения и энергосиловых параметров прокатки сложных фасонных профилей с использованием вариационных принципов механики сплошных сред. В основу моделей положен единый системный подход, который заключается в представлении сложных фасонных профилей и формирующих их калибров как совокупности отдельных типовых базовых элементов. С помощью моделей производится расчет деформации металла на свободных поверхностях, сил, моментов и мощности прокатки в фасонных калибрах.

Универсальные модели используются при автоматизированном проектировании калибровок валков сложных фасонных профилей отраслевого и специального назначения и входят отдельным расчетным модулем в состав отраслевой САПР ТП «Сортовая прокатка».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев В. С. Системный подход к вопросу автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки сложных фасонных профилей / В. С. Медведев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 3. – С. 41–47.
2. Тарновский И. Я. Вариационные принципы механики в теории обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, В. Л. Колмогоров и др. – М. : *Металлургиздат*, 1963. – 54 с.
3. Тарновский И. Я. Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. – М. : *Металлургиздат*, 1963. – 672 с.
4. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович. – М. : *Металлургия*, 1972. – 352 с.
5. Илюкович Б. М. Алгоритм расчета параметров процесса прокатки в сортовых калибрах / Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова, А. В. Шаповалов // *Сортопрокатное производство : отрасл. сб. науч. тр.* – Харьков : *УкрНИИМет*, 1977. – С. 32–35.
6. Медведев В. С. Влияние неравномерности обжатия металла по ширине стенки на высотную деформацию фланцев при прокатке / В. С. Медведев // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. – К. : *НТТУ «КПИ»*. – 2010. – № 60. – С. 237–238. – (Серія : «Машинобудування»).
7. Медведев В. С. Математическое моделирование прокатки в фасонных калибрах в среде MathCAD / В. С. Медведев, А. Н. Маслений // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 2 (59). – С. 32–35.

Медведев В. С. – д-р техн. наук УкрГНТЦ «Энергосталь».

УкрГНТЦ «Энергосталь» – Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь», г. Харьков.

E-mail: niimet@energostal.org.ua