

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ СЛОЖНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Розглянуті математичні моделі визначення формозміни й енергосилових параметрів прокатки складних фасонних профілів з використанням варіаційних принципів механіки суцільних середовищ. В основу моделей покладений єдиний системний підхід, який полягає у представленні складних фасонних профілів і калібрів, в яких вони формуються, як сукупності окремих типових базових елементів.

Mathematical models for defining form change and energy-power parameters of rolling complex shaped sections with using of variational principle of continuum mechanics are considered. As a basis for the models we use unified system approach, which represents complex shaped sections and forming them rollers as the set of separate typical base elements.

Развитие машиностроения, транспорта и других отраслей промышленности во многом определяется экономичностью сортамента сортового проката.

Необходимость снижения металлоемкости машин и оборудования ставит перед металлургами задачу расширения сортамента и увеличения объемов производства экономичных фасонных профилей проката, т.е. профилей по форме максимально приближенных к готовым деталям и изделиям. Как правило, сложные фасонные профили производятся малотоннажными партиями.

Применение таких профилей у потребителей позволяет экономить в среднем около 15% металла. При этом значительно сокращаются и трудовые затраты.

Вместе с тем, освоение новых экономичных фасонных профилей на металлургических предприятиях весьма затруднительно и требует значительных материальных затрат.

Это связано с тем, что процесс прокатки в сложных фасонных калибрах изучен еще недостаточно, исследования разрознены, носят частный характер, отсутствуют универсальные методы расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки, а также надежные методики расчета калибровок валков.

Применяемые традиционные способы прокатки и калибровки не учитывают малотоннажность профилей, что приводит к большим материальным потерям - увеличивается число опытных прокаток, расход металла, валков, энергоносителей.

Ввиду многообразия форм сложных фасонных профилей требуется осуществление единых методологических и системных подходов к решению задач пластического течения металла в фасонных калибрах и создания универсальных методов расчета формоизменения металла, энергосиловых параметров прокатки и научно обоснованных методов проектирования калибровок валков.

Проблема освоения новых экономичных фасонных профилей может быть кардинально решена путем дальнейшего развития научных основ прокатки в сложных фасонных калибрах и создания на основе системных исследований базовых энерго- и ресурсосберегающих технологий и гибких специализированных малотоннажных станов для производства фасонных профилей широкого сортамента.

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 краях: полосовой-клиновой, угловой, пластовый тавровый, ребровой тавровый и крестообразный (рис. 1).

Подавляющее большинство фасонных профилей с развитой поверхностью формируется 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.

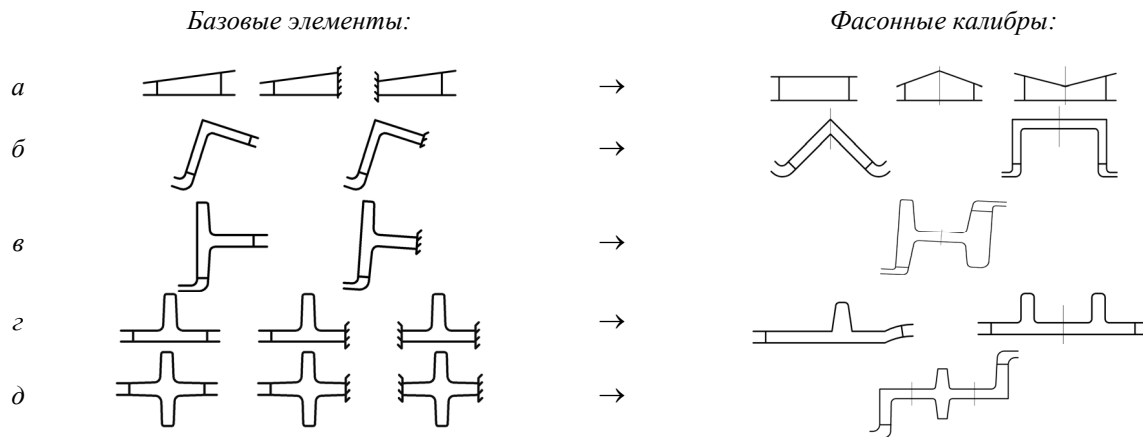


Рис. 1. Базовые элементы фасонных калибров: *а* – полосовой-клиновой; *б* – угловой; *в* – пластовый тавровый; *г* – ребровой тавровый; *д* – крестообразный

Целью теоретических исследований было математическое моделирование процессов прокатки в фасонных калибрах, выявление закономерностей течения металла, определение формоизменения и энергосиловых параметров прокатки.

Теоретическое исследование проведено с использованием методов, основанных на вариационных принципах механики сплошных сред [2-5]. Исследовано течение металла в угловых, пластовых и ребровых тавровых элементах калибров.

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 жестко-пластической 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 μ и коэффициента k , характеризующего положение поверхности раздела течения металла в поперечном направлении при свободном уширении стенки или полка.

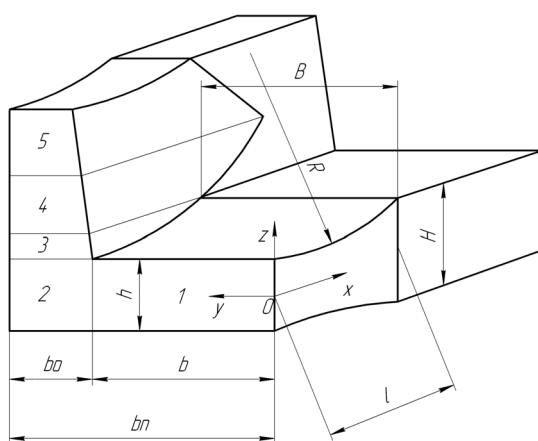


Рис. 2. Очаг деформации углового элемента

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

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

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

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

- на участке открытого фланца углового элемента

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

- на участках открытого и закрытого фланцев пластового таврового элемента

$$v_{xj} = v_{x1};$$

$$v_{yj} \Big|_{j=2,4,6,8} = -x \frac{v_{\theta}}{R} \frac{y-B_n}{F_{yj}-B_n} \sin \varphi \cos \varphi;$$

$$v_{y5} = \frac{v_{y1}}{B-B_n} (B_n - y);$$

- на участках гребня ребрового таврового элемента

$$v_{xj} = v_{x1};$$

$$v_{yj} \Big|_{j=3,4,5} = -xy \frac{v_{\theta}}{R F_{yj}} \sin \varphi \cos \varphi;$$

$$v_{y2} = \frac{v_{y1}}{b_0} y;$$

- на фланцах и гребне скорость v_{zj} находится из условия постоянства объема

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

Константы C_j определяются из соответствующих граничных условий.

$$\varepsilon_{xj} = \frac{\partial v_{xj}}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yj} = \frac{\partial v_{yj}}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zj} = \frac{\partial v_{zj}}{\partial z};$$

$$\varepsilon_{xyj} = \frac{\partial v_{xj}}{\partial y} + \frac{\partial v_{yj}}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yzj} = \frac{\partial v_{yj}}{\partial z} + \frac{\partial v_{zj}}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xkj} = \frac{\partial v_{zj}}{\partial x} + \frac{\partial v_{xj}}{\partial z};$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xj} - \varepsilon_{yj})^2 + (\varepsilon_{yj} - \varepsilon_{zj})^2 + (\varepsilon_{zj} - \varepsilon_{xj})^2 + \frac{3}{2} (\varepsilon_{xyj}^2 + \varepsilon_{yzj}^2 + \varepsilon_{xkj}^2)}$$

Скорости деформации и интенсивность скоростей деформации

$$\text{Полная мощность прокатки } N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n N_{\text{en},j} + \sum_{j=1}^n N_{\text{mp},j} + \sum_{j=1}^n N_{\text{cp},j}.$$

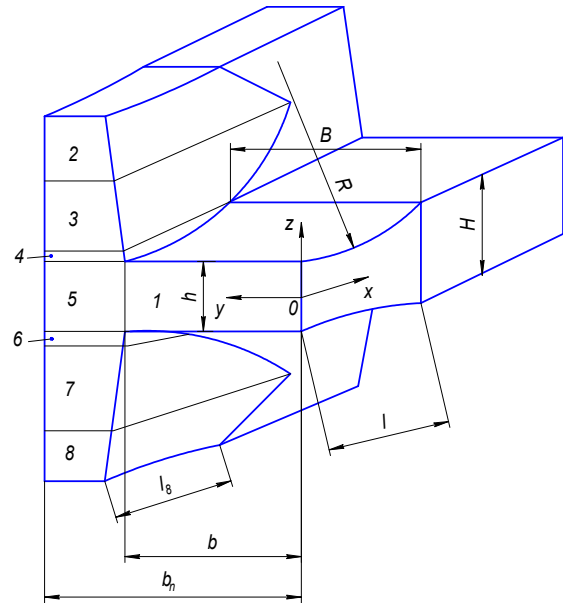


Рис. 3. Очаг деформации пластового таврового элемента

Мощности внутренних сил и сил трения $N_{вн.j} = \sigma_s \iiint_{V_j} \varepsilon_{ij} dV$ и $N_{мп.j} = \psi \tau_s \iint_{F_j} v_{ск.j} dF$, где ψ – коэффициент, учитывающий зависимость сил трения от состояния трущихся поверхностей формы очага деформации.

Мощность сил среза, учитывающая скачкообразное изменение скорости v_{cp} в направлении обжатий на входе в очаг деформации, $N_{cp.j} = \tau_s \iint_{F_j} v_{cp.j} dF$, где $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ – предел текучести при сдвиге (условие Мизеса). Варьируемые параметры μ 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

$$e_{zz5} = \int_0^{lx5} \frac{\varepsilon_{z5}|_{z=+0,5H+ho}}{v_{x5}|_{z=+0,5H+ho}} dx; \quad e_{zz8} = \int_0^{lx8} \frac{\varepsilon_{z8}|_{z=0,5H+H\phi o}}{v_{x8}|_{z=0,5H+H\phi o}} dx; \quad e_{zz5} = \int_0^{lx5} \frac{\varepsilon_{z5}|_{z=+0,5H+hz}}{v_{x5}|_{z=+0,5H+hz}} dx;$$

$$e_{yy1} = \int_0^{ly1} \frac{\varepsilon_{y1}|_{y=0}}{v_{x1}|_{y=0}} dx; \quad e_{yy1} = \int_0^{ly1} \frac{\varepsilon_{y1}|_{y=Bn}}{v_{x1}|_{y=Bn}} dx.$$

Момент и сила прокатки: $M = \frac{N_{\Sigma}}{V_{\theta}} R$ и $P = \sum_{j=1}^n P_j$, где $P_j = \frac{N_{вн.j} + N_{мп.j} + N_{cp.j}}{\iint_{F_j} v_{zj}}$.

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, а зависит при прочих равных

условиях только от общей вытяжки стенки. 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 трех рассмотренных выше базовых элементов. Параметры прокатки сложного профиля определяются комплексно с

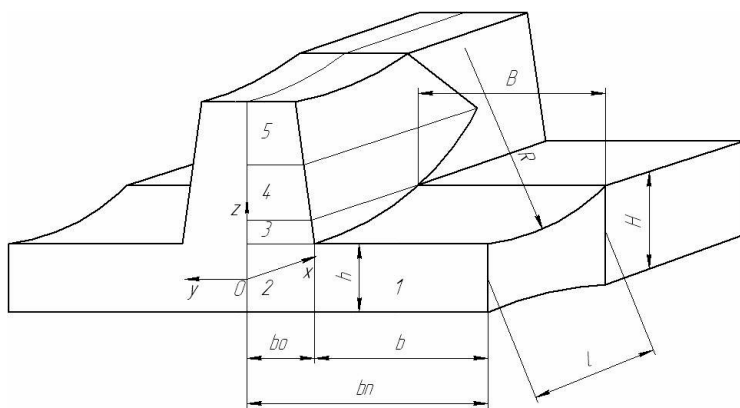


Рис. 4. Очаг деформации ребрового таврового элемента

учетом разнообразия сочетаемых элементов с постоянной или переменной толщиной стенок и полок и с учетом различных граничных условий на боковых краях 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. и 6.

После приведения действительной формы калибра к базовой с использованием разработанных математических моделей производится расчет высотной деформации η_h открытых фланцев и гребней,

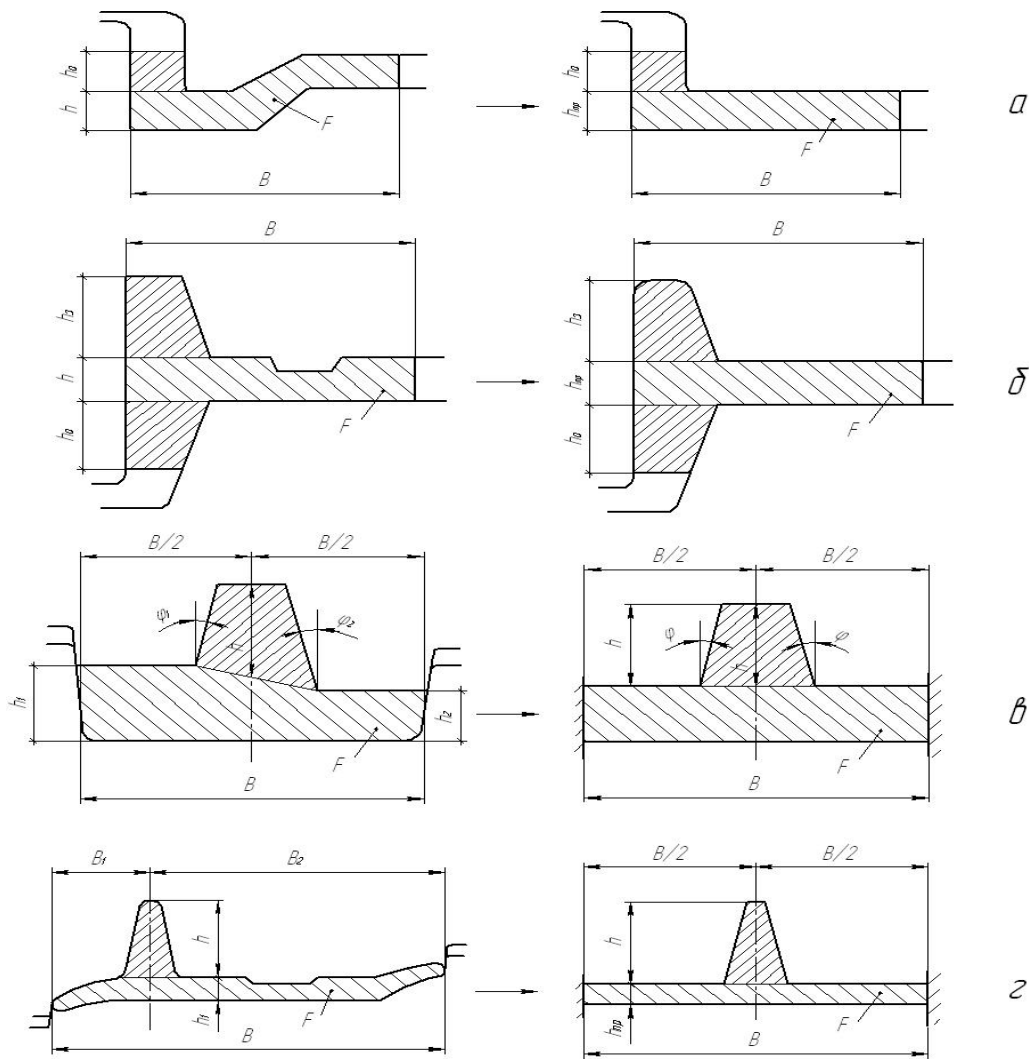


Рис. 5. Действительные (слева) и базовые (справа) калибры, состоящие из одного элемента:
а – углового; б – плоского таврового; в, г – ребрового таврового

свободного уширения β 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: $P = \sum_1^n P_n$; $M = \sum_1^n M_n$; $N = \sum_1^n N_n$, где n – число базовых элементов в данном калибре.

Расчет варьируемых параметров, формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки выполняется в среде MathCAD [6].

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 полок, 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;

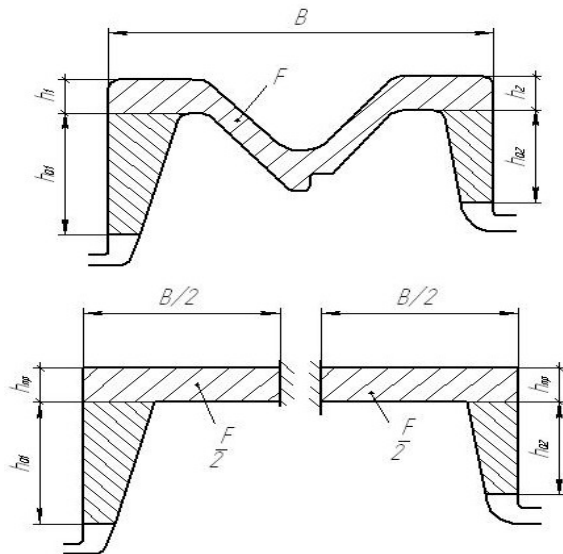


Рис. 6. Действительный калибр и базовый, состоящий из двух угловых элементов

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

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.

Вывод

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 энерго- и ресурсосберегающих технологий прокатки и калибровок валков экономичных фасонных профилей отраслевого и специального назначения и малотоннажных станов для их производства и входят отдельным расчетным модулем в состав отраслевой САПР ТП «Сортовая прокатка», и входят отдельным расчетным модулем в состав отраслевой САПР ТП «Сортовая прокатка».

Список литературы

1. Медведев В.С. Системный подход к вопросу автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки сложных фасонных профилей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008 – №3. – С.41–47
2. 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. 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. Математическое моделирование прокатки в фасонных калибрах в среде MathCAD / В.С.Медведев, А.Н. Маслennyй // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ, 2009. – №2(59). – С.32–35