

Метод исследования настройки прокатного стана на математических моделях формоизменения металла в фасонных калибрах

Н.Е. НЕХАЕВ

Днепродзержинский государственный технический университет

На математических моделях формоизменения металла в фасонных калибрах разработан метод исследования области управляемой настройки заполнения элементов чистового калибра у каждого из разъемов валков путём изменения настройки предчистовых и черновых клетей. Метод позволяет количественно оценить возможности настройки калибровки и разработать практические рекомендации по выбору систем калибров и способов настройки прокатного стана.

На математичних моделях формозміни металу у фасонних калібрах розроблено метод дослідження області керованого настроювання заповнення елементів чистового калібру в кожному із роз'ємів валків шляхом зміни настроювання передчистових і чорнових клітей. Метод дозволяє кількісно оцінити можливості настроювання калібрування й розробити практичні рекомендації з вибору систем калібрів і способів настроювання прокатного стану.

On mathematical models of forming metal in shaped calibers the method of research of area of operated adjustment of filling of elements of fair caliber at each of sockets rolls by change of adjustment prefair and draft of mills is developed. The method allows to appreciate quantitatively opportunities of adjustment of calibration and to develop practical recommendations at the choice of systems of calibers and ways of adjustment of the rolling mill

«Опытный калибровщик достигает совпадения пробных темплетов с шаблонами уже с первой пробы; менее опытный, но правильно рассчитывающий и рассуждающий калибровщик, достигает того же со второго раза или при трудных калибровках самое большее с третьей настройки. Кто принужден делать настройку больше трех раз, тот не понимает своего дела»

В. Тафель

Проблема качественного заполнения двух- и многовалковых калибров неоднократно отмечается в исследованиях формоизменения металла как асимметричных профилей, так и профилей с вертикальной осью симметрии [1-8]. Выявленные особенности формоизменения носят ярко выраженный характер при прокатке малотоннажных партий сложных фасонных профилей (СФП) на малоклетевых прокатных станах, особенно с применением многовалковых калибров.

При проектировании калибровки малотоннажной партии СФП стоит задача разработки промежуточных форм калибров от заготовки простого сечения до готового фасонного профиля за малое число проходов. При этом требуется обеспечить хорошее заполнение металлом (без лысок и лампасов) каждого элемента чистового калибра в районах разъемов валков и получить прокат без поверхностных дефектов (без закатов и подрезов). Учитывая, что в момент начальной установки валков и валковой арматуры прокатного стана по расчетной калибровке в районах разъемов валков часто наблюдается значительное отличие (рис. 1) между проектным и фактическим заполнением металлом каждого элемента чистового калибра, выдвигается весьма важная задача последующей настройки валков (калибров) и

валковой арматуры прокатного стана для получения качественного проката.

Валки и валковая арматура прокатного стана представляют собой рабочий инструмент, жестко фиксируемый относительно оси проката, и перемещаемый при регулировке калибров в поперечном сечении относительно друг друга. На рабочий инструмент обычно и возлагается задача настройка стана. Предпочтительно осуществлять настройку стана только за счет регулировки (управляющих перемещений) валков, как основного формообразующего инструмента.

В силу асимметрии большинства СФП для их прокатки с высокой точностью необходимо обеспечить индивидуальную настройку заполнения каждого элемента чистового калибра в направлении каждого разьема валков. Для этого системы калибров СФП должны обладать возможностью избирательной (независимой) настройки заполнения элементов чистового калибра. Управляющие перемещения валков обычно не могут принимать произвольные значения, а подчинены некоторым ограничениям. В основном ограничения связаны с возникновением поверхностных дефектов проката (закатов и подрезов), с увеличением нагрузок на привода прокатных клетей, с ухудшением условий захвата металла валками и др.

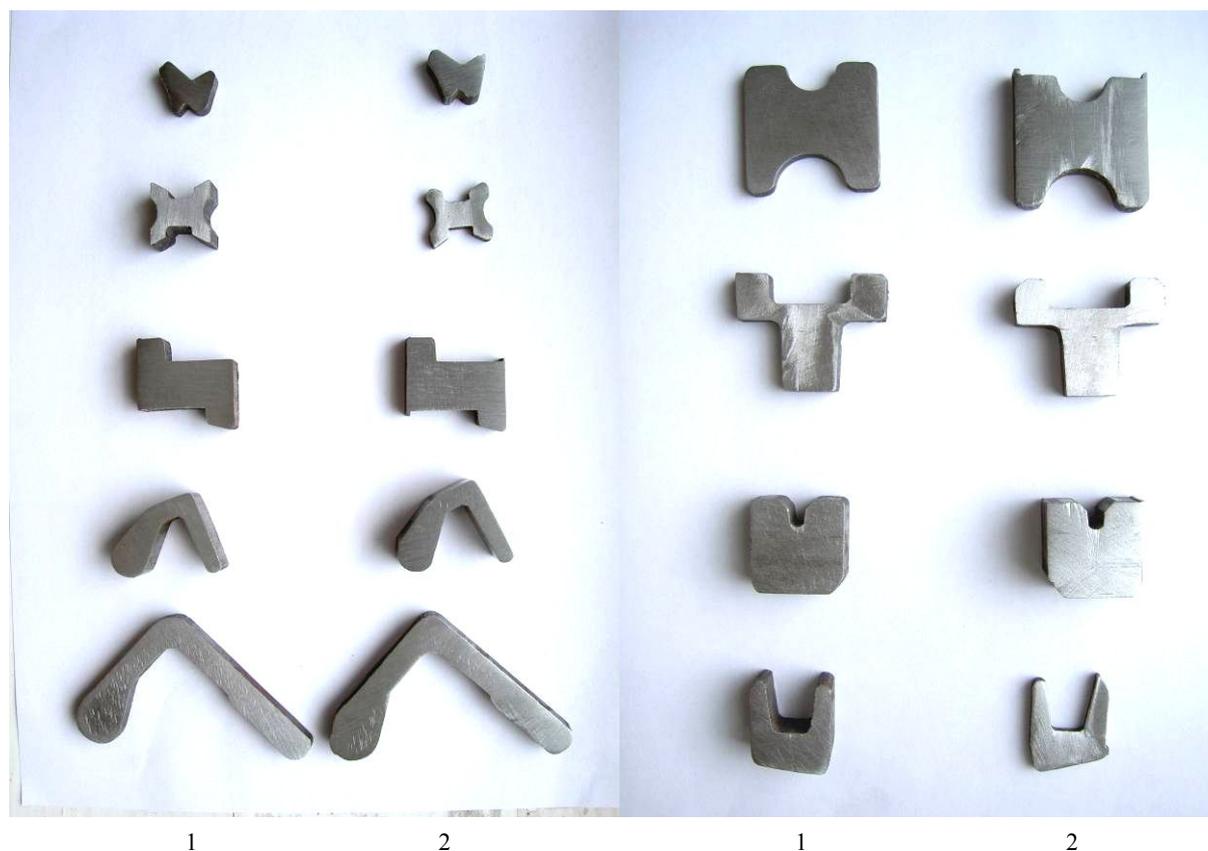


Рис. 1. Дефекты заполнения металлом фасонных калибров: 1 — качественный прокат; 2 — прокат с дефектами (лампасы и лыски)

Переход управляемого объекта (в нашем случае это калибровка валков) из одного состояния (расчетного) к другому (настроенному на качественный прокат) может быть осуществлен различными способами. Поэтому возникает вопрос о выборе такого пути (способа настройки стана), который окажется наиболее выгодным (будет достигнут путем минимальных отклонений от проектных размеров предчистовых и черновых калибров).

Разработка метода оценки регулируемости системы калибров и анализ на его основе действующих и разрабатываемых систем калибров, а также выбор эффективного способа их настройки является актуальной задачей.

В общем виде заполнение y какого-либо одного из элементов чистового фасонного калибра можем представить в виде функции установки валков x_i предчистовых и черновых калибров

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Используя принцип суперпозиции, то есть рассматривая действие каждой переменной x_i независимо, а результаты суммируя, математическую модель заполнения элемента чистового калибра можем представить в виде линейного полинома

$$y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n, \quad (2)$$

где n — общее количество регулируемых установок валков; $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ — коэффициенты полинома.

Изменение (регулируемость) заполнения одного из элементов чистового калибра определим как полный дифференциал функции (2) и запишем следующим образом

$$dy = A_1dx_1 + A_2dx_2 + \dots + A_n dx_n. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой математическую модель настройки заполнения одного из элементов чистового калибра, а коэффициенты A_i являются частными производными функции y по x_i или, иначе говоря, скоростями изменения заполнения элемента чистового калибра по направлениям единичных перемещений dx_i (изменений регулируемых установок валков)

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Полагая, что при регулировке валков любые единичные перемещения валков в любом из калибров системы находятся в равных между собой условиях, введем единичное n — мерное пространство регулировки системы калибров, в котором единичные пере-

мещения валков dx_i равны по величине и направлению базисным векторам \vec{e}_i .

Уравнение (3) с учетом (4) представим в виде скалярного произведения двух векторов

$$dy = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \vec{e}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n dx_i \vec{e}_i \right) = \nabla y \cdot d\vec{\theta}, \quad (5)$$

где ∇y — вектор-градиент, указывающий в n -мерном пространстве регулировки системы калибров направление наискорейшего заполнения элемента чистового калибра; $d\vec{\theta}$ — главная диагональ единичного n -мерного пространства регулировки системы калибров.

В качестве критерия скорости настройки (регулируемости) системы калибров в одном направлении регулировки R_1 можем выбрать отношение длины вектора градиента ∇y и единичного вектора \vec{e}_i , которое численно равно модулю вектора градиента

$$R_1 = |\nabla y| = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}, \quad (6)$$

и количественно характеризует степень суммарного влияния единичных регулирующих перемещений валков dx_i в системе калибров на единичное dy заполнение одного из элементов чистового калибра.

В случае наличия m элементов чистового калибра, отличающихся условиями формоизменения, имеем систему из m уравнений вида (3) с n неизвестными

$$\left. \begin{aligned} dy_1 &= A_{11}dx_1 + A_{12}dx_2 + \dots + A_{1n}dx_n \\ dy_2 &= A_{21}dx_1 + A_{22}dx_2 + \dots + A_{2n}dx_n \\ &\dots\dots\dots \\ dy_m &= A_{m1}dx_1 + A_{m2}dx_2 + \dots + A_{mn}dx_n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

представляющую собой математическую модель настройки заполнения металлом m элементов чистового калибра. Для этого случая необходимо иметь общий критерий, характеризующий общую (среднюю) скорость настраиваемости (регулируемости) R_m системы калибров, и определяемый через частные критерии R_j посредством операции конъюнкции (логического произведения)

$$R_m = \bigcap_{j=1}^m R_j. \quad (8)$$

Таким общим критерием регулируемости системы калибров R_m может являться отношение длины стороны приведенного m — мерного кубика с объемом, равным объему построенного на векторах ∇y_j m -мерного параллелепипеда в n -мерном пространстве регулирования, к единичной длине базисного вектора \vec{e}_i . То есть, фактически R_m характеризуется длиной стороны a приведенного m -мерного кубика, определяемого с помощью выражения

$$R_m = \sqrt[m]{\left(\begin{array}{cccc} (\nabla y_1 \cdot \nabla y_1) & (\nabla y_1 \cdot \nabla y_2) & \dots & (\nabla y_1 \cdot \nabla y_n) \\ (\nabla y_2 \cdot \nabla y_1) & (\nabla y_2 \cdot \nabla y_2) & \dots & (\nabla y_2 \cdot \nabla y_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\nabla y_m \cdot \nabla y_1) & (\nabla y_m \cdot \nabla y_2) & \dots & (\nabla y_m \cdot \nabla y_n) \end{array} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

где $(\nabla y_j \cdot \nabla y_i)$ — скалярные произведения векторов-градиентов в n -мерном пространстве регулирования.

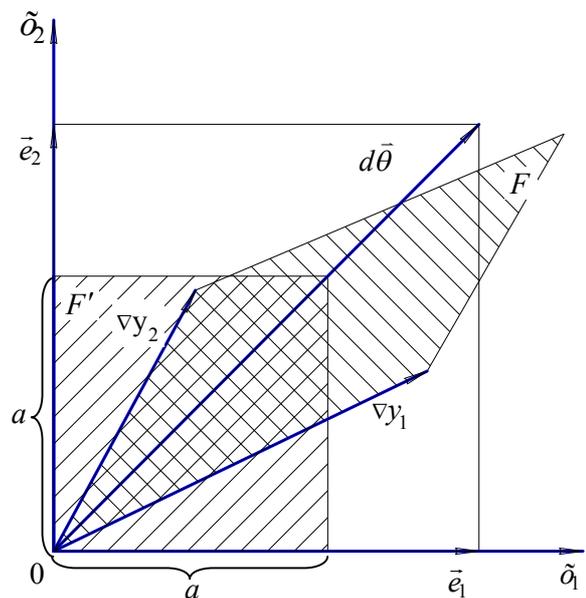
Подкоренное выражение (9) представляет собой объем m -мерного параллелепипеда [9], построенного на системе векторов ∇y_j и охватывающего в единичном n -мерном пространстве регулирования область средней скорости настройки заполнения металлом m элементов чистового калибра.

Для двух направлений регулирования ($m = 2$) показатель (9) соответствует квадратному корню из модуля векторного произведения двух градиентов (рис. 2)

$$R_2 = \sqrt{|\nabla y_1 \times \nabla y_2|}, \quad (10)$$

для трех направлений регулирования ($m = 3$) показатель соответствует корню кубическому из смешанного произведения трех градиентов

$$R_3 = \sqrt[3]{(\nabla y_1 \times \nabla y_2) \cdot \nabla y_3}. \quad (11)$$



$$F = |\nabla y_1 \times \nabla y_2|; \quad F' = a^2;$$

$$F = F'; \quad R_2 = \frac{a}{|\vec{e}_i|}$$

Рис. 2. Геометрическая интерпретация критерия регулируемости для двух направлений регулирования в двухмерном пространстве настройки валков

Разработанный в дифференциальном виде критерий [10] для различных систем калибров представляет

