

РАЗРАБОТКА БАЗОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ РАСКАТОВ В ПЛАНЕ ПРИ РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ С КАНТОВКОЙ И ПРОФИЛИРОВАНИЕМ ШИРОКИХ ГРАНЕЙ

Руденко Е.А. (ГВУЗ «Донецький національний технічний університет», г. Донецьк), Юрьев О.М. (НПО «Доникс», г. Донецьк)

Разработана базовая математическая модель процесса формоизменения раскатов в плане при реверсивной прокатке толстых листов с кантовкой и профилированием широких граней на этапе черновой прокатки. Предложен алгоритм расчета параметров формы раскатов и параметры точности расчета профилирующих обжатий. Произведена оценка точности расчета параметров формоизменения.

Для сокращения расхода металла при прокатке толстых листов в настоящее время используют различные технологические приемы, однако наибольшие показатели по выходу годного достигнуты в большинстве случаев за счет снижения концевой и боковой обрезки путем управления формой раскатов в плане на этапе черновой прокатки.

Самые высокие показатели по выходу годного до 94,8 % получены на японских ТЛС [1]. Этот уровень достигнут в основном за счет применения переменных по длине раскатов обжатий в горизонтальных валках черновой клетки в определенных проходах (МАС-процесс).

Аналогичный способ прокатки толстых листов разработали сотрудники Донничермета Ю.В.Коновалов, Ю.В.Фурман, В.Г.Носов и др. [2]. Сущность способа состоит в прогнозировании формы раската после определенного прохода в горизонтальных валках черновой клетки и изменении обжатия по длине раската (профилирования широкой грани) в этом проходе с целью получения раската прямоугольной формы. Широкую грань профилируют, увеличивая обжатия по длине концов от торцов к основной части длины раската, как в первом продольном проходе («протяжка»), так и в последнем поперечном проходе при «разбивке ширины» [3].

Следует отметить, что известные способы прокатки (в частности МАС-процесс) в технической литературе представлены без математического описания параметров формоизменения и алгоритма их расчета, что делает невозможным их реализацию. Основное положение, используемое в работе [3], согласно которому смещенный объем металла на концах раска-

та равен объему металла в утолщениях после профилирования, принципиально неверен. Объем металла по длине на участках по ширине с увеличивающейся толщиной после кантовки на 90^0 и проглаживания идет не только на образование концов. В основном он идет на вынужденное уширение. И только при образовании и исчезновении «жестких концов» этот объем металла постепенно смещается в длину, образуя вогнутую форму переднего и заднего торцов раската. По нашему мнению полностью в концы переходит металл утолщений по краям ширины раската на длине концов, равной 2-3 длины очага деформации. Поэтому приведенные в работах зависимости не могут выполнять функцию прогнозирования и быть использованы в алгоритмах управления формой раскатов в плане.

Очевидно, что в реальных условиях прокатки листов прямоугольную форму в плане может иметь только исходный сляб. На всех стадиях прокатки перед любым проходом, кроме первого, раскат имеет непрямоугольную форму в плане. Поэтому важное значение имеет метод расчета параметров формоизменения раскатов в плане с учетом кантовок и реверсов.

Авторы работы [4] для исследования формоизменения торцов начальных прямоугольных в плане раскатов предложили параметры формы торцов раскатов (значения стрел выпуклости на переднем и заднем концах раската) при прокатке на ТЛС рассчитывать как сумму произведений приращений стрел вытяжек, образованных в каждом из проходов на коэффициент, который учитывает влияние на суммарную вытяжку каждой из частных стрел коэффициента суммарной вытяжки раската, расположение стрел на концах раската и направление прокатки раската.

Недостатком работы [4] является то, что на параметры формы концов раската не учтено влияние отношения ширины к толщине раската, а также отношение диаметра к толщине по проходам. Не исследованы расширение и длина расширенных участков концов раската по проходам.

Целью работы является разработка базовой математической модели процесса формоизменения и алгоритма расчета параметров формы раскатов в плане при прокатке толстых листов с профилированием широких граней на этапах черновой прокатки.

В работе [5] приведена математическая модель, основанная на рекуррентном выражении, согласно которому параметры формы концов раската после любого прохода в горизонтальных валках предложено определять, применяя принцип суперпозиции, как сумму двух составляющих. Первая составляющая является результатом деформации внешней части конца ($K_{Z_i} \cdot Z_{i-1}$), вторая ($K_{Z_{oi}} \cdot Z_{oi}$) – условного прямоугольного конца раската. Особенностью формоизменения концов вписанного прямоугольного конца раската является наличие перед ними неполных жестких зон, уменьшающих неравномерность течения металла по ширине.

Для случая прокатки раскатов, которые после определенных проходов имеют вогнутое поперечное сечение (полученное в результате профи-

лирования) в известное рекуррентное выражение [5] следует добавить третью составляющую формоизменения ($Z^{\delta h}_i$).

Таким образом, в соответствии с описанным механизмом для расчета параметров формы f_i , δ_i и l_i переднего и заднего конца раската (f_i - стрела выпуклости/вогнутости конца, δ_i - расширение/сужение на конце, l_i - длина расширенных/суженных концов) следует использовать рекуррентное выражение следующего вида:

$$Z_i = K_{Zi} \cdot Z_{i-1} + K_{Zoi} \cdot Z_{oi} + Z^{\delta h}_i, \quad (1)$$

где K_{Zi} - коэффициенты передачи параметров формы переднего (заднего) конца внешнего контура раската в i -том проходе;

K_{Zoi} - коэффициенты передачи (сдерживания неполными жесткими зонами внешнего контура) параметров формы переднего (заднего) конца вписанного прямоугольного раската в i -том проходе.

При этом параметры формы раската рассчитываются по формулам, которые получены физическим моделированием и имеют следующий вид:

$$Y_{n,3} = K_0 B_0 (B_0 / H_0)^{K_1} (\Delta H / H_0)^{K_2} (D_p / H_0)^{K_3} \quad (2)$$

где $Y_{n,3}$ - стрелы выпуклости переднего f_{no} , заднего f_{zo} торцов, расширения переднего δ_{no} , заднего δ_{zo} торцов, длины переднего l_{no} и заднего l_{zo} концов с переменной шириной;

$B_0, H_0, \Delta H, D_p$ - ширина и толщина заготовки/раската, абсолютное обжатие и диаметр рабочих валков соответственно;

K_0, K_1, K_2, K_3 - коэффициенты моделей, полученные для условий прокатки толстых листов для широкого ряда ТЛС.

Расчет параметров формы раскатов в плане после второго и последующих обжатий. На входе в валки перед вторым (следующим) обжатием раскат имеет прямоугольную форму в плане, соответствующую форме после первого (предыдущего) обжатия.

Если перед i -тым проходом не производилась кантовка на 90° и поперечное сечение раската прямоугольное (профилирование широких граней не производилось) то параметры формы раската после i -го прохода рассчитываются по рекуррентному выражению (1) с использованием его первых двух слагаемых, а в случае профилированной прокатки используются все три слагаемых выражения.

Параметры формы концов условно вписанного в контур входного раската после i -го прохода $Z_{n(z)oi}$ рассчитываются по тем же зависимостям, что для условий прокатки исходного прямоугольного сляба.

Расчет параметров формы раската в случаях реверсивной прокатки и кантовки на 90° . В случае реверсивной прокатки после реверса параметры формы переднего конца присваиваются заднему и наоборот: $Z_{ni} := Z_{zi-1}$; $Z_{zi} := Z_{ni-1}$.

В случае кантовки раската перед i -тым проходом на 90° (производится перед поперечными проходами для «разбивки ширины» и перед окончательными продольными проходами после «разбивки ширины») необходимо переименовать габаритные размеры раската, а также переименовать и пересчитать параметры формы в плане.

Расчет профилирующих обжатий широких граней раскатов, обеспечивающих их прямоугольную форму в плане. Расчет профилирующего обжатия в последнем проходе «протяжки» $\Delta H_{\text{проф.}}^{\text{прот.}}$ осуществляется по разработанной зависимости следующего вида:

$$\Delta H_{\text{проф.}}^{\text{прот.}} = K_0 \cdot H_{\text{прот.ср.}} \left(\frac{B_{0\text{р.ш.}}}{H_{\text{прот.ср.}}} \right)^{K_1} \cdot \lambda_{\text{р.ш.}}^{K_2} \cdot \left(\frac{D_p}{H_{\text{прот.ср.}}} \right)^{K_3}, \quad (3)$$

где $H_{\text{прот.ср.}} = H_{\text{прот.}} + \Delta H_{\text{прот.}} / 2$;

$H_{\text{прот.}}$ – заданная толщина после последнего прохода «протяжки»;

$\Delta H_{\text{прот.}}$ – обжатие в последнем проходе «протяжки»;

$\lambda_{\text{р.ш.}}$ – коэффициент суммарной вытяжки на этапе «разбивки ширины»;

K_0, K_1, K_2, K_3 – коэффициенты.

Расчет профилирующего обжатия в последнем проходе «разбивки ширины» осуществляется аналогичным образом с использованием соответствующей зависимости.

Профилирующие обжатия проводят совместно с рабочими обжатиями в последних проходах «протяжки» и/или «разбивки ширины».

Расчет параметров формы раскатов в плане после кантовки и условного проглаживания профилированного раската. После «протяжки» или «разбивки ширины», кантовки и условного проглаживания параметры формы рассчитываются по зависимостям, также имеющим вид (2).

Расчет распределения обжатий по длине раската при профилировании. Профилирующее обжатие производят в «чистом виде» в случае, когда профилируют раскат в специальном проходе без основного обжатия. Добавлять профилирующий проход в конце «разбивки ширины» нецелесообразно, т.к. он влияет на длину раската, а следовательно, на ширину в продольных проходах, увеличивает время прокатки. Поэтому профилирование осуществляют совместно с основным обжатием. Основное условие распределения – вытяжка должна быть такой же, как и при рабочем обжатии. Профилирование без дополнительной вытяжки возможно если:

$$\Delta H_{\text{ср.проф.}} \leq \Delta H_{\text{зад.}} \quad (4)$$

Т.к. продольный вид распределения профилирующего обжатия близок к параболическому, то приведенное (среднее) профилирующее обжатие равно

$$\Delta H_{\text{ср.проф.}} = \frac{2}{3} \Delta H_{\text{проф.}}; \quad (5)$$

В предельном случае

$$\frac{2}{3} \Delta H_{\text{проф.}} = \Delta H_{\text{зад.}} \quad (6)$$

При «корытообразном» распределении профилирующего обжатия оно на концах раската равно нулю. Затем обжатие увеличивается и достигает максимального значения $\Delta H_{\text{проф.}}$, когда прокатана $1/3$ длины раската. После прокатки $2/3$ длины обжатие уменьшается к заднему концу до нуля. Профилирующее обжатие по середине длины больше заднего в $3/2$ раза.

Если $\Delta H_{\text{ср.проф.}}$ меньше, чем $\Delta H_{\text{зад.}}$, то обжатие на концах раската составляет

$$\Delta H_{(L=0, L=L_1)} = \Delta H_{\text{зад.}} - \frac{2}{3} \Delta H_{\text{проф.}} \quad (7)$$

На длине раската от $L = L_1 / 3$ до $L = \frac{2}{3} L_1$, обжатие максимальное

$$\Delta H_{(L=\frac{1}{3}L_1, \frac{2}{3}L_1)} = \Delta H_{\text{раб.}} + \frac{1}{3} \Delta H_{\text{проф.}} \quad (8)$$

Если $\Delta H_{\text{ср.проф.}}$ больше, чем $\Delta H_{\text{зад.}}$, то профилирование осуществляется с вытяжкой, равной отношению

$$\lambda = \lambda_{\text{пр}} = H_0 / (H_0 - H_{\text{ср.проф.}}) \quad (9)$$

Толщина раската после профилирования будет меньше заданной на $\Delta H_{\text{ср.проф.}} - \Delta H_{\text{зад.}}$

Расчет суммарных значений параметров формы раскатов после профилирования перед кантовкой. После проходов, в которых производится профилирование широких граней раската и последующей кантовки параметры формы $f_n, f_z, \delta_n, \delta_z$ состоят из суммы, одной из составляющих которой являются параметры формы, обусловленные профилированием.

Перед «разбивкой ширины» после «протяжки»

$$\left. \begin{aligned} f_{n.o.p.ш.}^{сум} &= f_{n.o.p.ш.} + f_{n.проф.}^{прот.}; \\ f_{з.о.p.ш.}^{сум} &= f_{з.о.p.ш.} + f_{з.проф.}^{прот.}; \\ \delta_{n.o.p.ш.}^{сум} &= \delta_{n.o.p.ш.} + \delta_{n.проф.}^{прот.}; \\ \delta_{з.о.p.ш.}^{сум} &= \delta_{з.о.p.ш.} + \delta_{з.проф.}^{прот.}, \end{aligned} \right\} (10)$$

где $f_{n.o.p.ш.}$, $f_{з.о.p.ш.}$, $\delta_{n.o.p.ш.}$, $\delta_{з.о.p.ш.}$ - параметры формы раскатов перед «разбивкой ширины» без учета профилирования в последнем проходе «протяжки».

Аналогичным образом рассчитываются параметры формы, обусловленные профилированием перед продольной прокаткой после «разбивки ширины».

Особенности алгоритма. При разработке алгоритма и реализующей его программы расчета параметров формы раскатов в плане учитывали следующие требования:

1. Возможность расчета параметров формы раскатов в плане при прокатке толстых листов из слябов на двухклетевых ТЛС с длиной бочки валков 2000-4000 мм, диаметрами рабочих валков 650-1200 мм.

2. Расчет параметров формы выполняется последовательно по проходам для всех возможных продольных и поперечных схем прокатки.

3. Профилирование выполняется на стадиях черновой прокатки перед кантовкой, когда длина раската меньше длины бочки валков.

4. Расчет профилирующих обжатий широких граней слябов в последних проходах «протяжки» и «разбивки ширины». Профилирование может производиться последовательно (два или одно) на любом этапе прокатки.

5. Первое профилирование должно обеспечить минимальную продольную разноширинность готовых листов, второе – минимальную выпуклость (вогнутость) их торцов.

6. Расчет всех составляющих обреза.

7. Оценка точности расчета профилирующих обжатий.

Для повышения точности расчета профилирующих обжатий в алгоритме предусмотрены два этапа расчета. На первом этапе производится предварительный расчет с использованием суммарной вытяжки и значения выпуклости (вогнутости) нерегулированного торца раската. На втором этапе расчетное значение профилирующего обжатия циклически уточняется до заданного значения точности.

При назначенном 1-вом профилировании производится предварительный расчет профилирующего обжатия в последнем проходе «протяжки», расчет составляющих параметров формы раската после кантовки и

условного проглаживания, их суммарные значения и расчет параметров формы раската по проходам «разбивки ширины». Далее выполняется проверка точности расчета 1 –го профилирующего обжатия по параметру Δ .

$$\Delta_1 = (f_{n.p.ш.проф} + f_{з.p.ш.проф.}) / (f_{n.p.ш.} + f_{з.p.ш.}). \quad (11)$$

Если $|\Delta_1| \leq 0,05$ - то расчет выполнен с заданной точностью (5%). При $|\Delta_1| > 0,05$ производится расчет коэффициента коррекции: $K_{кор} = 1 + \Delta_1$.

Далее производится перерасчет 1-го профилирующего обжатия, и снова проверяется точность.

В случае достижения заданной точности 1-го профилирования производится дальнейший последовательный расчет параметров формы раскатов до последнего прохода в чистой клетке.

При заданном 2-ом профилировании производится предварительный расчет 2-го профилирующего обжатия, которое производится в последнем проходе «разбивки ширины». Затем рассчитываются параметры формы после кантовки с учетом условного проглаживания и параметры формы по продольным проходам черновой и чистой клетки.

По значениям выпуклости (вогнутости) торцов готового листового раската после 2-го профилирования и без профилирования определяют показатель точности расчета профилирующего обжатия Δ_2 .

В связи с тем, что передний и задний торцы листов могут иметь различную форму (выпуклую или вогнутую) минимизировать их значения одновременно невозможно.

Поэтому при расчете точности Δ_2 параметры формы концов раската привели к значениям, определяющих массу обрезаемых концов. Учитывая, что торцы раската имеют параболическую форму, площадь отрезаемых концов пропорциональна стрелам $f_n, f_з$.

При $f_n, f_з < 0$ (вогнутые торцы)

$$\Delta_{2n(з)} = \frac{1}{3} |f_{n(з)}|; \quad (12)$$

При $f_n, f_з > 0$ (выпуклые торцы)

$$\Delta_{2n(з)} = \frac{2}{3} |f_{n(з)}|. \quad (13)$$

Суммарный показатель площади (массы) концов

$$\Delta_2 = \Delta_{2n} + \Delta_{2з}. \quad (14)$$

Если $\Delta_2 > \Delta_{2зад}$, то рассчитывается коэффициент коррекции

$$K_{кор} = 1 + \frac{\Delta_2}{\Delta_{2зад}}, \quad (15)$$

где $\Delta_{2зад}$ – заданный в программе показатель площади (массы) концов.

Затем перерасчитывается 2-е профилирующее обжатие и параметры формы во всех продольных проходах.

Такие циклы производятся до тех пор, пока не выполнится условие $\Delta_2 \leq \Delta_{2зад}$.

Алгоритм расчета параметров формы раскатов в плане на ТЛС и реализующая его компьютерная программа «Толстяк» являются составными частями комплексного алгоритма и программы расчета всех технологических параметров прокатки. Программа разработана в НПО «Доникс»¹ и предназначена для совершенствования процессов прокатки толстых листов с профилированием широких граней раскатов, проектирования гидронажимных устройств черновой клетки стана, разработки систем автоматизированного управления формой раскатов в плане и мероприятий по реконструкции черновых клеток толстолистовых станов.

Оценку точности расчетов параметров формы раскатов в плане выполнили в основном по экспериментальным данным продольной разноширинности и выпуклости концов на готовых листовых раскатах или по данным на подкатах в чистовую клетку для условий прокатки на ТЛС 2300 «ДМЗ», 2800 АлМК и ОХМК, 3000 МарМК им.Ильича, 3600 МК «Азов-сталь».

Установлено, что точность расчета длины выпуклых торцов на всех ТЛС составляет (-8,2...+9,0)%, а продольной разноширинности (-0,1...+22,0)%. Такая точность в полной мере удовлетворяет прокатчиков и специалистов по автоматизации при разработке новых технологических процессов и АСУ ТП.

Таким образом, разработанная базовая математическая модель и алгоритм расчета параметров формы раскатов в плане позволяют рассчитывать параметры формоизменения раскатов по проходам с учетом кантовок и реверсов в условиях профилированной прокатки и могут быть использованы в математическом обеспечении автоматизированной системы управления формой раскатов в плане.

Литература

1. Nanarawa T., Tsubota K., Miyouki J. *Development of new plant view pattern control system in Iron and Steel Eng.* – 1979. – 56. - №9. – P. 66-69.

¹ Программа разработана А.Л. Остапенко, Н.В. Миненко

2. А.с. 716653 СССР, МКИ В21В 1/38. Способ прокатки листов / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, В.Г. Носов (СССР). - №2612773/22-02, Заявлено 10.05.78; Опубл. 25.02.80, Бюл. №7. – 2с.

3. Разработка и опробование нового способа улучшения формы раскатов в плане на листовых станах / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, Н.Н. Шкурко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1985. - №4. – С. 23-24.

4. Чернер М.И., Воропаев А.П., Хорошилов Н.М. Исследование закономерностей формоизменения раскатов при прокатке толстых листов // *Сталь*. – 1978. - №8. – С. 26-28.

5. Руденко Е. А. Математическая модель формоизменения раската в плане при прокатке в черновой горизонтальной клети толстолистового стана // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. науч. Тр. – Вып. 4. – Краматорск, 1998. – С. 167-172.*

© Руденко Е.А., Юрьев О.М. 2008