

УДК 621.771.23-413

Н.Г. ИЕВЛЕВ*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ЛИСТА В ПЛАНЕ НА РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Рентабельність виробництва листового прокату істотно залежить від виходу придатного, який у значній мірі визначається формою листа у плані, тобто формою кінців прокату і коливаннями ширини по довжині смуги, які обумовлюють кінцеву і бічну обрізь. Зменшення металоемності вимагає зменшення бічної і торцевої обрізі, що можливо при наближенні форми прокату у плані до прямокутної. У статті розглянуті різні способи управління формою листа у плані у залежності від складу устаткування стана. Проведено дослідження математичного опису формоутворення товстого листа у плані стосовно автоматизованої системи управління формою листа у плані (СУФЛ) на товстолістовому прокатному стані. Наведено математичні моделі для стріли опуклості прокату, математичні моделі природного розширення і утяжки ширини, а також сумарного розширення прокату. Розглянуто рішення задачі з автоматичного управління формою листа у плані шляхом профілювання широких граней прокату на прикладі системи управління формою листа у плані (СУФЛ) для листового реверсивного стану гарячої прокатки 1500, що входить до складу АСУ ТП стана 1500. Основними функціями СУФЛ є визначення профілювання прокату по товщині і позиційне управління гідравлічним натискним пристроєм. Критерієм управління є відхилення форми листа у плані від бажаної (прямокутної). Як запобіжне наближення форми листа до прямокутної у плані використовується величина опуклості (угнутості) переднього і заднього кінців листа. Викладений у статті підхід до управління формою листа у плані був використаний при розробці автоматизованих систем управління формою листа у плані (СУФЛ) на ряді листових станів.

Ключові слова: товстолістовий стан, автоматичне управління, математичні моделі, формоутворення листа у плані, АСУ ТП.

Аннотация. Рентабельность изготовления листового проката существенно зависит от выхода годного, который в значительной мере определяется формой листа в плане, то есть формой концов проката и колебаниями ширины по длине полосы, обуславливающих концевую и боковую обреш. Уменьшение металлоемкости требует уменьшения боковой и торцевой обреш, что возможно при приближении формы проката в плане к прямоугольной. В статье рассмотрены различные способы управления формой листа в плане в зависимости от состава оборудования стана. Проведено исследование математического описания формообразования толстого листа в плане применительно к автоматизированной системе управления формой листа в плане (СУФЛ) на толстолістовом прокатном стане. Приведены математические модели для стрелы выпуклости проката, математические модели естественного уширения и утяжки ширины, а также суммарного уширения проката. Рассмотрено решение задачи по автоматическому управлению формой листа в плане путем профилирования широких граней проката на примере системы управления формой листа в плане (СУФЛ) для листового реверсивного стана горячей прокатки 1500, входящей в состав АСУ ТП стана 1500. Основными функциями СУФЛ являются определение профилировки проката по толщине и позиционное управление гидравлическим нажимным устройством. Критерием управления является отклонение формы листа в плане от желаемой (прямоугольной). В качестве меры приближения формы листа к прямоугольной в плане используется величина выпуклости (вогнутости) переднего и заднего концов листа. Изложенный в статье подход к управлению формой листа в плане был использован при разработке автоматизированных систем управления формой листа в плане (СУФЛ) на ряде листовых станов.

Ключевые слова: толстолістовой стан, автоматическое управление, математические модели, формообразование листа в плане, АСУ ТП.

Abstract. The profitability of the production of plate rolling depends on the yield, which is largely determined by the shape of the plate in plan, i.e. the shape of the ends of the rental and fluctuations in

width along the length of the strip, causing the end and side trim. A decrease in metal consumption requires a decrease in the side and end trim, which is possible when the shape of the rolled metal is approached in plan view to a rectangular one. The article discusses various ways to control the shape of the plate in terms of depending on the composition of the mill equipment. The study of the mathematical description of the formation of a plate in the plan with reference to the automated control system of the plate shape in the plan (CSPS) on a plate rolling mill is carried out. Mathematical models for the convexity arrow of rolling, mathematical models of natural broadening and tensile width, as well as the total broadening of the hire are given. The solution to the problem of automatic control of the plate shape in the plan by profiling wide faces of rolled metal is considered using the example of the control system of the plate shape in the plan (CSPS) for the plate reversible hot rolling mill 1500, which is a part of the ACS TP of the mill 1500. The main functions of the CSPS are to determine the profiling of rolled products thickness and positional control of the hydraulic pressure device. The control criterion is the deviation of the plate shape in the plan from the desired (rectangular). As a measure of approximating the shape of the plate to a rectangular plan, the convexity (concavity) of the front and rear ends of the plate is used. The approach to managing the plate form in the plan described in the paper was used in the development of automated control system of the plate shape in the plan (CSPS) on a number of plate mills.

Keywords: plate mill, automatic control, mathematical models, plate shaping in plan, ACS TP.

DOI: 10.34121/1028-9763-2019-3-111-119

1. Введение

Рентабельность изготовления листового проката существенно зависит от выхода годного, который в значительной мере определяется формой листа в плане, то есть формой концов раската и колебаниями ширины по длине полосы, обуславливающих концевую и боковую обрезь. Уменьшение металлоемкости требует уменьшения боковой и торцевой обрезки, что возможно при приближении формы раскатов в плане к прямоугольной.

Целью настоящей работы является исследование математического описания формообразования толстого листа в плане применительно к автоматизированной системе управления формой листа в плане (СУФЛ) на толстолистовом прокатном стане.

2. Математическое описание формообразования толстого листа в плане

Управление формой листа (раската) в плане осуществляется различными способами в зависимости от состава оборудования стана. Если на стане отсутствует гидравлическое нажимное устройство (ГНУ) в вертикальной и горизонтальной черновой клетки, приближение формы раската в плане к прямоугольной достигается выбором схемы прокатки, соотношения вытяжек при продольной и поперечной прокатке в черновой горизонтальной клетки, распределения обжатий в вертикальной клетки, а также распределения обжатий в черновой горизонтальной клетки на этапе разбивки ширины [1].

Наиболее предпочтительна с точки зрения формы раската в плане продольная схема прокатки с протяжкой и «разбивкой ширины», при этом продольные оси исходной заготовки и готового листа совпадают. Для получения раската с параллельными кромками рекомендуется, чтобы коэффициент вытяжки при протяжке λ_n приближался к коэффициенту вытяжки при «разбивке ширины» $\lambda_{ш}$. Существуют также рекомендации о стратегиях распределения обжатий на этапе «разбивки ширины», обеспечивающих приближение формы раската к прямоугольной, например, стратегия, предусматривающая равенство обжатий в парах пропусков при четном суммарном числе пропусков на этапе [2].

Эффективным средством улучшения формы раската в плане является также прокатка в вертикальной клетки (на станах, где такая клетка установлена). Рекомендации по выбору обжатий в вертикальной клетки приведены в [1, 3, 4].

Наличие в черновой горизонтальной клетки нажимного устройства, позволяющего изменять толщину раската в процессе прокатки (при протяжке и «разбивке ширины»), позволяет применить принцип MAS-прокатки [1, 5], который обеспечивает путем профилиро-

вания раската по толщине компенсацию искажений боковых и торцевых кромок, возникающих при последующей вытяжке до заданной толщины. Изменение толщины $\delta h(x)$ в координатах x от торцевой грани, компенсирующее искажение боковых кромок, определяется выражением

$$\delta h(x) = [T(x)ah_f] / b, \quad (1)$$

где $T(x)$ – прогноз искажения боковых кромок, h_f – конечная толщина листа, a – коэффициент, b – ширина сляба.

Профилировка $\delta h(y)$ на этапе «разбивки ширины», компенсирующая искажения торцевых кромок, аналогична осуществляемой согласно формуле (1) с заменой $T(x)$ на $G(y)$ – ожидаемое искажение торцов и b на L – длину сляба.

Процесс формообразования раската в плане с предварительным профилированием толщины отражен на рис. 1 и 2.

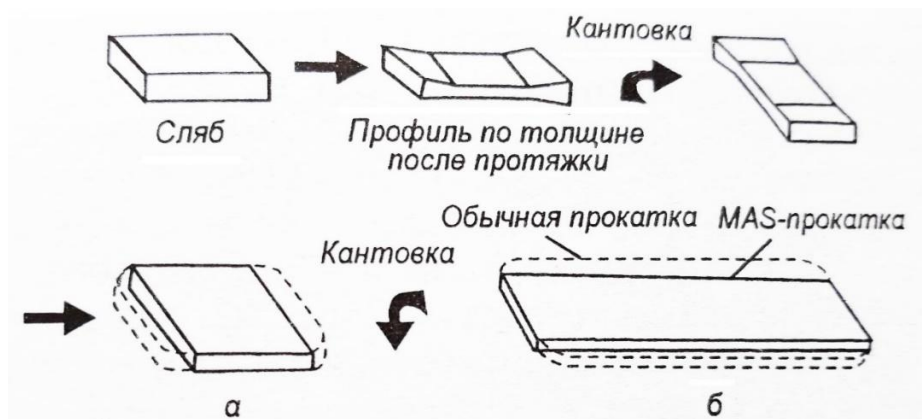


Рисунок 1 – Принцип MAS-прокатки для уменьшения боковой обрезки: *a* – форма раската в плане после «разбивки ширины»; *b* – после прокатки до конечной толщины

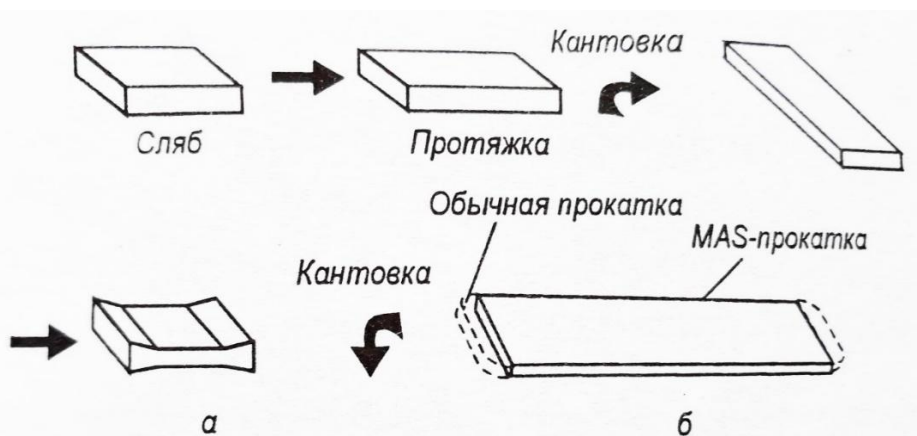


Рисунок 2 – Принцип MAS-прокатки для уменьшения торцевой обрезки: *a* – профиль по толщине после «разбивки ширины»; *b* – форма раската в плане после прокатки до конечной толщины

Прокатка в системе горизонтальная – вертикальная клеть при удовлетворительной форме боковых кромок характеризуется специфическим искажением торцов, минимизация которого достигается выбором суммарных обжатий по ширине и толщине, а также дополнительным обжатием кромок полосы в районе торцов («заточкой»). Упомянутое перемен-

ное обжатие боковых кромок в вертикальной клетке может быть выполнено при наличии ГНУ в вертикальной клетке [5].

В процессе автоматического управления по рассчитанному режиму обжатий в горизонтальной и вертикальной клетках прогнозируется форма раската в плане. Для этого используются регрессионные модели вида

$$\begin{aligned} S_H &= f_1(A_S, h/b, R_H, \Delta h), \\ \delta_H &= f_2(A_O, h/b, R_H, \Delta h), \\ S_V &= f_3(A_{1S}, h/b, R_V, \Delta b), \\ \delta_V &= f_4(A_{1O}, h/b, R_V, \Delta b), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\delta_{H(V)} = b_{cp} - (b_{ПК} + b_{ЗК})/2$ – разноширинность концов после обжатия в горизонтальной (вертикальной) клетке, $b_{ПК}, b_{ЗК}, b_{cp}$ – ширина переднего конца раската, ширина заднего конца раската, ширина средней по длине части раската, $S_{H(V)} = l_{cp} - l_k$ – выпуклость (вогнутость) торцов раската после обжатия в горизонтальной (вертикальной) клетке, l_{cp}, l_k – длина раската по его продольной оси и по краю, A_S, A_O, A_{1S}, A_{1O} – параметры, характеризующие химический состав прокатываемого металла, $\Delta h, \Delta b$ – обжатие по толщине и ширине, $R_{H(V)}$ – радиус рабочих валков горизонтальной (вертикальной) клетки.

Математические модели результирующей формы раската в плане за цикл прокатки базируются на «суперпозиции» искажений формы по пропускам и учете условия вытяжки каждого продольного сечения раската. При получении результирующего значения искажения формы раската в плане учитывается изменение формы поперечного сечения при входе и выходе металла из валков. Форма боковой и торцевой граней раската в координатах по длине и ширине описывается параболой, порядок которой зависит от b/h .

Рассмотренные зависимости позволяют, задавшись конечной формой раската, режимом обжатий (исключается первый пропуск в вертикальной клетке), определить требуемое компенсирующее воздействие в вертикальной клетке (величина обжатия торцов или боковых кромок) или в горизонтальной клетке (рассчитать продольную профилировку раската, которая после кантовки будет формой поперечного сечения).

Рассмотрим решение задачи по автоматическому управлению формой листа в плане путем профилирования широких граней раската на примере системы управления формой листа в плане (СУФЛ) для листового реверсивного стана горячей прокатки 1500, входящей в состав АСУ ТП стана 1500. Основными функциями СУФЛ являются определение профилировки раската по толщине и позиционное управление ГНУ [6].

Критерием управления является отклонение формы листа в плане от желаемой (прямоугольной). В качестве меры приближения формы листа к прямоугольной в плане используется величина выпуклости (вогнутости) переднего и заднего концов листа.

Для решения задачи минимизации торцевой обрезки на стане была предусмотрена схема прокатки из двух этапов: на первом этапе, состоящем из одного пропуска, производят прокатку слябов в направлении, перпендикулярном к продольной оси готового раската (аналогично этапу разбивки ширины) с переменным обжатием по длине, далее раскат кантуют на 90° и прокатывают до заданной толщины (второй этап).

Задачу автоматического управления формой листа в плане можно разделить на две последовательно решаемые задачи: 1) определение профилировки раската по толщине при

прокатке его поперек продольной оси с целью приближения формы листа к прямоугольной и достижение заданной ширины; 2) позиционное управление ГНУ.

Управлениями в 1-й задаче являются: положение плунжера ГНУ в зависимости от длины прокатанной заготовки, определяемое до начала пропуска, и совет оператору об ограничении скорости при профилировании. Управление во 2-й задаче – задающий сигнал на скорость мотор-насосов ГНУ, выдаваемый в течение пропуска.

Математическая постановка задачи определения профилировки раската имеет следующий вид.

Определить $H_{ГНУ}(x)$, обеспечивающее $\min S_{\Sigma}$ при $P(x) \leq P_{доп}$,

$$V = V_{3AD}, H_{ГНУ}(x) \leq H_{ГНУ_{max}}, V_{ГНУ}(x) \leq V_{ГНУ_{max}}, a_{ГНУ} \leq a_{ГНУ_{max}}, \quad (3)$$

$$\delta b^- \leq l_N + \delta b_y - b_N \leq \delta b^+,$$

где $H_{ГНУ}(x)$ – положение плунжера ГНУ по длине раската, S_{Σ} – стрела выпуклости (вогнутости), $P(x)$ – усилие прокатки при профилировке, $P_{доп}$ – максимально допустимое усилие прокатки, V – скорость прокатки, V_{3AD} – заданная скорость прокатки при профилировке раската, $V_{ГНУ}(x), a_{ГНУ}(x)$ – скорость и ускорение перемещения плунжера ГНУ, $H_{ГНУ_{max}}, V_{ГНУ_{max}}, a_{ГНУ_{max}}$ – соответственно максимальные значения перемещения, скорости перемещения и ускорения перемещения плунжера ГНУ, l_N – длина (будущая ширина) раската после профилировки, δb_y – уширение раската при продольной прокатке, b_N – заданная ширина листа после прокатки, $\delta b^+, \delta b^-$ – соответственно значение положительного и отрицательного допуска по ширине, x – текущая координата по длине.

Математическая формулировка задачи позиционного управления ГНУ имеет следующий вид.

Определить $\Delta n = n_1 - n_2$, обеспечивающее

$$\delta_{ГНУ}^- \leq H_{ГНУ}^{Re}(x) - H_{ГНУ}(x) \leq \delta_{ГНУ}^+ \quad (4)$$

при $v = v_{3AD}, n_{1_{min}} \leq n_1 \leq n_{1_{max}}, n_{2_{min}} \leq n_2 \leq n_{2_{max}}$,

где n_1, n_2 – частота вращения соответственно гидронасоса и гидромотора, $H_{ГНУ}^{Re}(x), H_{ГНУ}(x)$ – положение плунжера ГНУ по длине раската, соответственно отработанное и заданное (полученное в результате решения 1-й задачи), $\delta_{ГНУ}^+, \delta_{ГНУ}^-$ – допустимое значение положительного и отрицательного отклонения установки ГНУ в заданное положение, n_{max}, n_{min} – наибольшая и наименьшая частота вращения гидронасоса, гидромотора, v и v_{3AD} – соответственно скорость прокатки и заданная скорость прокатки при профилировании раската.

При автоматическом управлении предусматривается использование как априорной информации об исходных данных прокатки, так и информации о текущих параметрах, на основании которой и производится расчет необходимых управлений. Основными технологическими параметрами являются усилие прокатки, раствор ненагруженных валков, положение плунжера ГНУ. Считывание информации с технологических датчиков производится по инициативным сигналам, формируемым вне СУФЛ и служащим для идентификации ситуаций на линии стана.

Форму раскатов, прокатанных по продольной схеме за один этап, можно оценить, как уже указывалось ранее, величиной выпуклости переднего и заднего концов раската:

$$S_{\Sigma} = \frac{S_{ПК} + S_{ЗК}}{2}.$$

Для уменьшения значения S_{Σ} и повышения таким образом выхода годного необходимо произвести профилирование широких граней раскатов в направлении, перпендикулярном к продольной оси готового раската. При этом продольный профиль раската, реализация которого компенсирует непрямоугольность торцов, описывается той же кривой, что и огибающая торцевых граней.

Так как СУФЛ, помимо минимизации торцевой обрезки, должна обеспечить и заданную ширину листа, то при расчете переменного по длине раската обжатия необходимо учитывать его последующее уширение.

В общем виде стрела выпуклости S_{Σ}^p является функцией параметров прокатки и проката:

$$S_{\Sigma}^p = f(h_0, b_0, h_N, \overline{\Delta h}, R, Q),$$

где h_0, b_0 – толщина и ширина исходной заготовки, h_N – толщина листа, $\overline{\Delta h}$ – вектор обжатий по пропускам, R – радиус рабочих валков, Q – количество прокатанного металла на данных валках, характеризующее износ, а, следовательно, и профиль валков.

При известном режиме обжатий используется модель

$$S_{\Sigma}^p = \sum_{i=1}^N S_i \frac{h_i}{h_N} - L_0 \frac{h_0}{h_N} \cdot \frac{K_Q Q}{L_N + K_Q Q},$$

где $S_i = (a_0 + a_1 \frac{l_{Ди}}{h_{0i}} + a_2 \frac{h_{0i}}{b_{0i}} + a_3 \frac{l_{Ди}}{b_{0i}}) \Delta h_i$ – стрела выпуклости, образованная в i -м пропуске, L_0 – исходная длина заготовки, N – суммарное количество пропусков, K_Q, a_0, \dots, a_3 – уточняемые параметры, $l_{Ди}$ – длина дуги захвата.

Если режим обжатий не известен, то необходимо пользоваться упрощенной моделью вида

$$S_{\Sigma}^p = 1640 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{0,747} \varepsilon_{\Sigma}^{2,63},$$

где D – диаметр рабочих валков, ε_{Σ} – суммарное относительное обжатие за цикл прокатки.

Огибающая торцевых граней может быть аппроксимирована параболой

$$S(x) = S_{\Sigma}^p \left[1 - \frac{2^n}{b^n} \left(x - \frac{b}{2} \right)^n \right],$$

где x – текущая координата, n – порядок параболы ($n = 2; 4$). Требуемый продольный профиль раската

$$\delta h(x) = \delta h^* \left[1 - \frac{2^n}{b^n} \left(x - \frac{b}{2} \right)^n \right],$$

где $2\delta h^*$ – максимальное обжатие при профилировании.

Значение δh^* находится из условия равенства $L_N^k = L_N^{oc}$ (L_N^k – длина боковой грани листа, L_N^{oc} – длина листа по продольной оси):

$$\delta h^* = S_{\Sigma}^p \frac{h_N}{L_0},$$

где L_0 – исходная длина заготовки.

При расчете переменного обжатия следует учитывать и необходимость получения заданной ширины листа:

$$\Delta h(x) = \Delta h + 2 \delta h(x),$$

где Δh – постоянная составляющая обжатия, обеспечивающая наряду с $\delta h(x)$ получение листа заданной ширины.

Для нахождения $\Delta h(x)$, обеспечивающего реализацию листа заданной ширины и минимум торцевой обрезки, необходимо решить следующее уравнение:

$$b_0 = \int_0^{b_y} \frac{dx}{\lambda(x)} = \int_0^{b_y} \frac{h_0 - \Delta h - 2\delta h(x)}{h_0} dx.$$

После взятия интеграла уравнение приобретает следующий вид:

$$b_0 = \left(h_0 - \Delta h - 2 \frac{n}{n+1} \delta h^* \right) \frac{b_y}{h_0}.$$

Решением данного уравнения является постоянная составляющая обжатия Δh , обеспечивающая совместно с $\delta h(x)$ получение листа заданной ширины:

$$\Delta h = h_0 - \frac{b_0}{b_y} h_0 - 2 \frac{n}{n+1} \delta h^*.$$

Как упоминалось выше, для получения листа заданной ширины b_N необходимо при профилировании учитывать уширение раската при его последующей прокатке, то есть

$$b_N = b_y + \delta b_{e\Sigma},$$

где $\delta b_{e\Sigma}$ – суммарное уширение.

Для прогнозирования значения $\delta b_{e\Sigma}$ математические модели естественного уширения и утяжки ширины [4] (утяжка вызвана неравномерной деформацией по ширине раската в первом пропуске продольной прокатки, обусловленной профилировкой широких грани раската по толщине в предыдущем пропуске):

$$\ln \frac{\delta b_{ei}}{\Delta h_i} = a_0 + a_1 \ln \frac{l_{Di}}{b_{i-1}} + a_2 \ln \frac{b_{i-1}}{h_{i-1}},$$

$$\delta b_{yT} = (1,57 - 2 \cdot 10^{-3} b_0 + 0,9 \cdot 10^{-6} b_0^2) (2,4 - 6\varepsilon + 5\varepsilon^2) + k_u \frac{b - b_{\min}}{b_{\max}} |\delta h_0 - \delta h_1|,$$

$$\delta b_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^N \delta b_{ei} - \delta b_{yT},$$

где k_n – уточняемый параметр, b_{\min}, b_{\max} – минимальная и максимальная ширина прокатываемых полос, $\delta h_0, \delta h_1$ – поперечная разнотолщинность раската до и после пропуска.

Данная модель используется при известном режиме обжатий. В противном случае необходимо пользоваться упрощенной моделью:

$$\delta b_{e\Sigma} = k\Delta h_{\Sigma},$$

где Δh_{Σ} – суммарное обжатие за цикл прокатки, k – уточняемый параметр.

В процессе эксплуатации изменяются характеристики объекта, что вызывает необходимость адаптации математических моделей. После окончания цикла прокатки оператором оценивается остаточная стрела выпуклости ΔS_{Σ} (в случае перекомпенсации ΔS_{Σ} станет отрицательной). На основании ΔS_{Σ} производится адаптация математической модели S_{Σ}^p путем введения в ее структуру дополнительного аддитивного члена $\beta\Delta S_{\Sigma}$ (β – коэффициент фильтрации).

По фактической ширине листа b_{ϕ} уточняется модель суммарного уширения раската путем введения в ее структуру дополнительного аддитивного члена $\beta_1(b_N - b_{\phi})$ (b_N – требуемая ширина листа, β_1 – коэффициент фильтрации).

Решение задач СУФЛ обеспечивается рядом алгоритмов, которые запускаются на решение в зависимости от ситуации на объекте. Простейшие технологические ситуации идентифицируются на основании инициативных сигналов (ИС), формируемых вне СУФЛ, а более сложные ситуации, по которым ветвятся алгоритмы, по упомянутым ИС и дополнительным признакам, формируемым как вне СУФЛ, так и алгоритмами СУФЛ.

3. Выводы

Проведено исследование математического описания формообразования толстого листа в плане применительно к автоматизированной системе управления формой листа в плане (СУФЛ) на толстолистовом прокатном стане. Рассмотрено решение задачи по автоматическому управлению формой листа в плане путем профилирования широких граней проката на примере системы управления формой листа в плане (СУФЛ) для листового реверсивного стана горячей прокатки.

Изложенные выше решения по управлению формой раската в плане применимы для реверсивных клетей листовых станов, оснащенных силовыми средствами воздействия на геометрические параметры раската в процессе прокатки и были использованы при разработке технорабочих проектов АСУ ТП для ряда станов, в том числе листовых станов 1500 и 2800.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Долженков Ф.Е., Коновалов Ю.В., Носов В.Г. и др. Повышение качества толстых листов. М.: Металлургия, 1984. 247 с.
2. Чернер М.И., Воропаев А.П., Хорошилов Н.М. Исследование закономерностей формоизменения раскатов при прокатке толстых полос. *Сталь*. 1978. № 8. С. 726–728.
3. Полухин П.И., Клименко В.М., Полухин В.П. и др. Прокатка толстых листов. М.: Металлургия, 1984. 288 с.
4. Бровман М.Я., Зеличенко Б.Ю., Герцев А.И. Усовершенствование прокатки толстых листов. М.: Металлургия, 1969. 256 с.
5. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.

6. Твардовский В.П., Полещук В.В., Иевлев Н.Г., Соловьев. В.В. Автоматизированное управление формой листа в плане на реверсивном стане 1500 горячей прокатки. Совершенствование технологии прокатки, термообработки и отделки толстолиствого проката. М.: Металлургия, 1984. С. 70–74.

Стаття надійшла до редакції 29.07.2019