

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ «НА УГОЛ» НА РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

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

Анотація. Одним із найважливіших показників якості управління процесом прокатки на товстолистовому стані є точність отримання геометричних розмірів прокату, яка визначає витрати металу на тонну продукції, зокрема, точність реалізації заданої ширини. Ширину листа, що перевищує ширину вихідної заготовки, при прокатці на товстолистових станах отримують на етапі розбивки ширини в горизонтальній клітці. Розбивку ширини в більшості випадків роблять шляхом прокатки заготовки під кутом 90° до поздовжньої осі майбутнього листа. Однак, якщо поворот прокату (сляба) на 90° неможливий (наприклад, при ширині прокату менше відстані між роликками), то частину даного етапу здійснюють прокаткою «на кут», менший 90° . У процесі такої прокатки змінюються розміри прокату по всіх осях і його форма у плані (спочатку прямокутна форма набуває вигляду паралелограма). У статті розглянуто математичний опис одного з варіантів формування ширини товстого листа при прокатці «на кут» щодо автоматизованої системи управління технологічним процесом товстолистового стану. На підставі концепцій, які описують формоутворення прокату у плані при прокатці «на кут», отримано вирази, що зв'язують параметри прокату і режим прокатки. Сформульовано задачу автоматичного управління режимом прокатки «на кут». Запропонований розрахунок режиму прокатки, який реалізується в темпі із процесом прокатки, забезпечує отримання прокату прямокутної форми заданої ширини за мінімальне число пропусків при дотриманні обмежень на обтиснення по пропусках. Викладений підхід до автоматичного управління режимом прокатки при прокатці на «кут» реалізовано в математично-модельній системі розрахунків параметрів прокатки і термозміцнення товстолистового стану 5000.

Ключові слова: прокатний стан, ширина листа, прокатка «на кут», автоматичне управління.

Аннотация. Одним из важнейших показателей качества управления процессом прокатки на толстолистовом стане является точность получения геометрических размеров проката, определяющая затраты металла на тонну продукции, в частности, точность реализации заданной ширины. Ширину листа, превышающую ширину исходной заготовки, при прокатке на толстолистовых станах получают на этапе разбивки ширины в горизонтальной клетке. Разбивку ширины в большинстве случаев производят путем прокатки заготовки под углом 90° к продольной оси будущего листа. Однако, если поворот раската (сляба) на 90° невозможен (например, при ширине раската уже расстояния между роликками), то часть рассматриваемого этапа осуществляют прокаткой «на угол» менее 90° . В процессе такой прокатки изменяются размеры раската по всем осям и его форма в плане (первоначально прямоугольная форма принимает вид параллелограмма). В статье рассмотрено математическое описание одного из вариантов формирования ширины толстого листа при прокатке «на угол» в отношении автоматизированной системы управления технологическим процессом толстолистового стана. На основании концепций, описывающих формообразование раската в плане при прокатке «на угол», получены выражения, связывающие параметры раската и режим прокатки. Сформулирована задача автоматического управления режимом прокатки «на угол». Предлагаемый расчет режима прокатки, который реализуется в темпе с процессом прокатки, обеспечивает получение раската прямоугольной формы заданной ширины за минимальное число пропусков при соблюдении ограничений на обжатия по пропускам. Изложенный подход к автоматическому управлению режимом прокатки при прокатке на «угол» реализован в математическом обеспечении системы расчетов параметров прокатки и термоупрочнения толстолистового стана 5000.

Ключевые слова: прокатный стан, ширина листа, прокатка «на угол», автоматическое управление.

Abstract. One of the most important indicators of the quality of control of the rolling process on a plate mill is the accuracy of obtaining the geometric dimensions of rolled metal, which determines the cost of metal per ton of product, in particular, the accuracy of the implementation of a given width. The sheet width exceeding the width of the initial billet, under rolling on plate mills, is obtained at the stage of breaking the width in a horizontal stand. Breakdown of the width in most cases is carried out by rolling the workpiece at an angle of 90° to the longitudinal axis of the future sheet. However, if the rotation of the roll (slab) is not possible at the stated angle (for example, when the width of the roll is less than the distance between the rollers), then a part of the considered stage is carried out by rolling “at an angle” less than 90° . In the process of such rolling, the dimensions of the roll along all axes and its shape in plan are changed (initially the rectangular shape takes the form of a parallelogram). The paper describes the mathematical description for one of the options for forming the width of a thick sheet when rolling “at an angle” in relation to an automated control system for the technological process of a plate mill. On the basis of the concepts describing the formation of the roll in the plan during rolling “at an angle”, the expressions were obtained that relate the parameters of the roll and the rolling mode. The problem of automatic control of the rolling mode “at an angle” is formulated. The proposed calculation of the rolling mode, which is implemented at a pace with the rolling process, provides a rectangular roll of a predetermined width for a minimum number of passes, subject to restrictions on the reduction in passes. The described approach to the automatic control of the rolling mode during rolling at the “angle” is implemented in the mathematical support of the system for calculating the rolling parameters and heat hardening of the plate mill 5000.

Keywords: rolling mill, sheet width, “at an angle” rolling, automatic control.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-2-99-104

1. Введение

Одним из важнейших показателей качества управления процессом прокатки на толстолистовом стане (ТЛС) является точность получения геометрических размеров проката, определяющая затраты металла на тонну продукции, в частности, точность реализации заданной ширины.

Целью настоящей работы является исследование математического описания для одного из вариантов формирования ширины толстого листа при прокатке «на угол» применительно к автоматизированной системе управления технологическим процессом толстолистостанового стана (АСУТП ТЛС).

2. Математическое описание процесса прокатки «на угол»

Ширину листа, превышающую ширину исходной заготовки, при прокатке на толстолистовых станах получают на этапе разбивки ширины в горизонтальной клетке. Разбивку ширины в большинстве случаев производят путем прокатки заготовки под углом 90° к продольной оси будущего листа [1]. Однако, если поворот раската (сляба) на 90° не возможен (например, при ширине раската уже расстояния между роликками), то часть рассматриваемого этапа осуществляют прокаткой «на угол» менее 90° [1–3] (рис. 1). В процессе такой прокатки изменяются размеры раската по всем осям и его форма в плане (первоначально прямоугольная форма принимает вид параллелограмма).

Следует учесть, что механическое оборудование ТЛС не обеспечивает надежной реализации заданных углов прокатки, что вносит неопределенность в управление формированием ширины. Целесообразно предусматривать возможность завершения разбивки ширины прокаткой под углом 90° к оси будущего листа. При этом значение вытяжки по ширине $\lambda_{b_{зад}}$ выбирается так, чтобы при максимальной ошибке в реализации ширины b_N (b_N – заданная ширина) реальное ее значение не превышало заданного для всего этапа раз-

бивки ширины (то есть номинал b_N смещается на соответствующую величину). По окончании прокатки «на угол» значение $\lambda_{зад}$ должно уточняться.

Количество пропусков прокатки «на угол» целесообразно минимизировать, что, с одной стороны, уменьшает неопределенность управления, с другой, не противоречит традиционной цели автоматизированного управления: минимизации количества пропусков прокатки за цикл. При этом для минимизации количества пропусков всего этапа разбивки ширины прокатку «на угол» необходимо осуществлять с допустимым по максимуму суммарным обжатием. Форма раската после завершения прокатки должна быть прямоугольной или близкой к прямоугольной в пределах неопределенности процесса [4]. В процессе прокатки необходимо соблюдать ограничения на обжатия согласно изложенному в [5], а также по условию раскантовки.

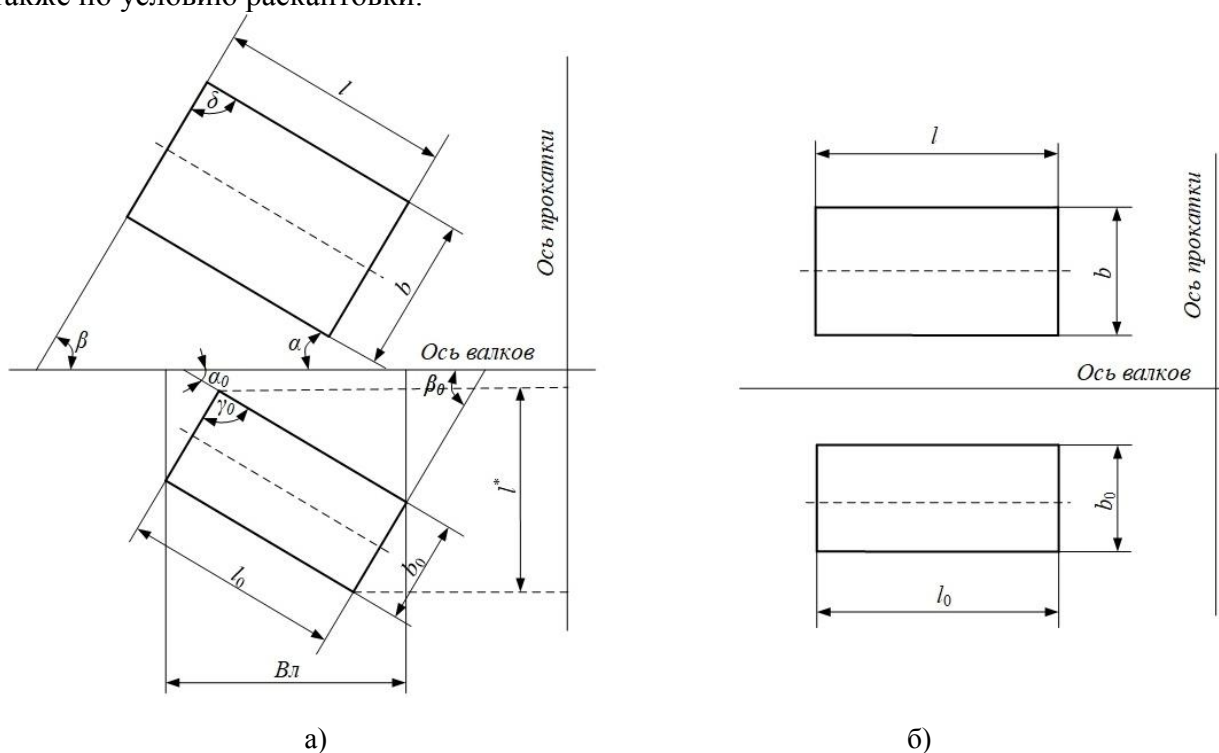


Рисунок 1 – Схемы прокатки на этапе разбивки ширины: а) прокатка «на угол»; б) разбивка ширины при угле 0°

Таким образом, задача автоматического управления режимом прокатки «на угол» формулируется в следующем виде [1]:
определить $\bar{\beta}, \bar{\lambda}$, обеспечивающие $\min N$

при

$$\lambda_{\min_i} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max_i}, \quad (1)$$

$$l_i^* \geq b^*, \quad (2)$$

$$b^* = \max(l_1, l_2), \quad (3)$$

$$b^* \leq b_N \leq b_{зад} / \lambda_{зад}, \quad (4)$$

$$\gamma_N = 90^\circ, \quad (5)$$

$$l_N \leq KL_\sigma \quad (6)$$

и $\max \Delta h_{\Sigma}$ при $\min N$,

где $\bar{\beta} = \{\beta_i\}$ – последовательность углов задачи раската в клетку по пропускам (рис. 1); $\bar{\lambda} = \{\lambda_i\}$, $\lambda_i = \frac{h_{0i}}{h_{1i}}$; h_0, h_1 – соответственно толщина раската до и после пропуска; L_0 – длина бочки рабочих валков; K – коэффициент запаса ($K = 0,8-0,9$); L_N – длина раската после прокатки; Δh_{Σ} – суммарное обжатие при прокатке; N – суммарное количество пропусков на этапе прокатки; $\lambda_{\max_i}, \lambda_{\min_i}$ – соответственно максимально и минимально допустимые значения λ_i ; l^* – значение проекции диагонали раската на ось прокатки (рис. 1); l_1, l_2 – соответственно расстояние между рабочим валком и первым станинным роликом и шагом станинных роликов; $b_{зад}$ – ширина раската, которую необходимо получить на этапе разбивки ширины; γ_N – угол между сторонами раската после прокатки.

На основании концепций, описывающих формообразование раската в плане при прокатке «на угол» [1, 6], получены выражения, связывающие параметры раската и режим прокатки, с учетом которых решается поставленная выше задача (рис. 1):

$$b = b_0 \sqrt{\cos^2 \beta_0 + \lambda^2 \sin^2 \beta_0}, \quad (7)$$

$$l = l_0 \sqrt{\cos^2 (\pi - \gamma_0 - \beta_0) + \lambda^2 \sin^2 \beta_0}, \quad (8)$$

$$\beta = \arctg(\lambda \operatorname{tg} \beta_0), \quad (9)$$

$$\alpha = \arctg[\lambda \operatorname{tg}(\pi - \gamma_0 - \beta_0)], \quad (10)$$

$$\gamma = \pi - \alpha - \beta. \quad (11)$$

Анализ выражений (7) – (11) показывает:

$$1) \partial b / \partial \beta_0 > 0; \quad 3) \partial (\gamma_0 - \gamma) / \partial b_0 < 0;$$

$$2) \partial b / \partial \lambda > 0; \quad 4) \partial (\gamma_0 - \gamma) / \partial \lambda > 0;$$

5) взаимосвязь между λ , углом задачи β_0 и углом между сторонами раската $\gamma_0 \left(\gamma_0 > \frac{\pi}{2} \right)$, обеспечивающая получение после пропуска прямоугольного раската $\gamma = \frac{\pi}{2}$, выражается следующим образом:

$$\lambda^* = \operatorname{tg} \beta_0 \operatorname{tg}(\pi - \gamma_0 - \beta_0)^{-1/2}, \quad (12)$$

при этом с увеличением β_0 требуемое значение λ^* возрастает, с уменьшением значения угла раската γ_0 , которым он подается в клетку $\left(\gamma_0 > \frac{\pi}{2} \right)$, λ^* уменьшается;

б) угол задачи β_0 , обеспечивающий получение после пропуска раската прямоугольной формы $\left(\gamma = \frac{\pi}{2} \right)$ и заданную вытяжку по ширине λ_b ($\lambda_b = \frac{b_1}{b_0}$), где b_0, b_1 – соответственно ширина раската до и после пропуска находится из выражения

$$\cos^2 \beta_0 + \frac{\sin^2 \beta_0}{\operatorname{tg} \beta_0 \operatorname{tg}(\pi - \gamma_0 - \beta_0)} = \lambda^2(\beta_0) = \lambda_b^2, \quad (13)$$

при этом с увеличением угла задачи β_0 вытяжка по ширине, обеспечивающая прямоугольность раската $\lambda(\beta_0)$, увеличивается;

7) максимально допустимый угол задачи β_0 , обеспечивающий максимальную вытяжку по ширине, определяется параметрами раската перед пропуском и параметрами стана:

$$\beta_{0\max} = \pi - \arcsin \frac{b^*}{\sqrt{l_0^2 + b_0^2 + 2l_0 b_0 \cos \gamma_0}} - \operatorname{arctg} \frac{l_0 \sin \gamma_0}{b_0 + l_0 \cos \gamma_0}. \quad (14)$$

С учетом изложенного выше, а также принимая во внимание тот факт, что минимальное число пропусков обеспечивает режим прокатки с максимально допустимыми обжатиями, начиная с первого пропуска, предлагается поставленную задачу решать в темпе с процессом прокатки в соответствии со следующими положениями.

Первоначально определяется требуемая суммарная вытяжка по ширине λ_{b_Σ} и оценивается возможность ее реализации за два пропуска с учетом ограничений (1)–(6), (14).

В случае нереализуемости прокатки «на угол» за два пропуска определяется граничное значение вытяжки по ширине λ_{b_i} ($\lambda_{b_i} = \sqrt{\lambda_{b_\Sigma}}$), после реализации которой производится раскантовка раската на другую диагональ. Условие раскантовки: $\lambda_{b_{i-1}}^{\operatorname{Re}} < \lambda_{b_i}$, $\lambda_{b_i}^{\operatorname{Re}} \geq \lambda_{b_i}$, где $\lambda_{b_{i-1}}^{\operatorname{Re}}$, $\lambda_{b_i}^{\operatorname{Re}}$ – реализованная вытяжка по ширине соответственно за $i-1$ -й и i -й пропуски. До момента раскантовки прокатка производится при $\beta_{0i} = \beta_{0\max_i}$ и $\lambda_i = \lambda_{\max_i}$, тем самым обеспечивая максимальную вытяжку за минимальное число пропусков и при минимальном искажении формы раската.

После раскантовки перед каждым пропуском по ограничениям (1), (2) с учетом (12)–(14) оценивается возможность реализации заданной ширины с одновременным получением прямоугольного раската в текущем пропуске. В случае превышения ограничения (1), (2) текущий пропуск реализуется при $\beta_{0i} = \beta_{0\max_i}$ и $\lambda_i = \lambda_{\max_i}$. Сравнительный анализ традиционного режима прокатки [1], при котором поддерживается постоянный угол λ_0 (см. рис. 1) с предлагаемым при одних и тех же ограничениях на обжатия исходных и заданных размерах раската, показал возможность уменьшения количества пропусков при прокатке «на угол».

Таким образом, предлагаемый расчет режима прокатки обеспечивает получение раската прямоугольной формы заданной ширины за минимальное число пропусков при соблюдении ограничений на обжатия по пропускам.

Точность получения заданной ширины и прямоугольности раската определяется как возможностями оборудования, так и точностью установки углов задачи. При ручном управлении они устанавливаются примерно и поэтому получение заданных параметров раската зависит от мастерства и опыта вальцовщика [1, 3]. При автоматическом управлении работой участка клетки стана можно повысить точность установки заданного угла задачи, используя линейки манипуляторов, и тем самым снизить неопределенность процесса. Для этого устанавливается раствор линеек B_n , соответствующий заданному углу задачи β_0 ,

$$B_n = b_n \cos \beta_0 + l_0 \cos(\pi - \gamma_0 - \beta_0) \quad (15)$$

и раскат кантуется до касания линеек манипуляторов.

3. Выводы

Рассмотрена задача автоматического управления режимом прокатки «на угол». Приведена постановка задачи с минимизацией количества пропусков. Управлениями являются угол прокатки и обжатия по пропуску. Излагается подход к решению задачи в темпе с процессом прокатки. Изложенный подход к автоматическому управлению режимом прокатки при прокатке на «угол», обеспечивающий получение раската прямоугольной формы заданной ширины за минимальное число пропусков при соблюдении ограничений на обжатия по пропуску, реализован в математическом обеспечении системы расчетов параметров прокатки и термоупрочнения толстолиствого стана 5000.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
2. Кугаенко М.Е., Ковынев М.В., Миллер В.В. Листопркатное производство. М.: Metallurgizdat, 1962. 429 с.
3. Долженков Ф.Е., Коновалов Ю.В., Носов В.Г. и др. Повышение качества толстых листов. М.: Metallurgiya, 1984. 247 с.
4. Ієвлев Н.Г. Автоматическое управление формообразованием листа в плане на реверсивном стане горячей прокатки. *Математичні машини і системи*. 2019. № 3. С. 111–119.
5. Ієвлев М.Г. Стратегії автоматичного керування режимами прокатки на товстолистових прокатних станах. *Автоматизація виробничих процесів*. 2007. № 1 (24). С. 41–47.
6. Павлов И.М. Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. М.-Л.: Главная редакция литературы по черной и цветной металлургии, 1938. 515 с.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2020