

УДК 658.52.011.56:621.771.23-413

Н.Г. ИЕВЛЕВ*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЛОСКОСТНОСТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АСУ ТП

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

Анотація. У статті розглянуто теоретичні і експериментальні дослідження площинності товстолистого прокату. Проведено теоретичний аналіз та ідентифікацію щодо експериментальних даних математичних моделей, що описують параметри короблення листа. Отримані результати можуть бути використані в АСУ ТП товстолистових станів.

Ключові слова: площинність, товстолистовий прокат, математичні моделі, короблення, АСУ ТП.

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования плоскостности толстолистого проката. Проведены теоретический анализ и идентификация по экспериментальным данным математических моделей, описывающих параметры коробления листа. Полученные результаты могут быть использованы в АСУ ТП толстолистовых станов.

Ключевые слова: плоскостность, толстолистовой прокат, математические модели, коробление, АСУ ТП.

Abstract. Theoretical and experimental studies of the flatness of plate rolling were considered in the article. Theoretical analysis and identification of mathematical models based on experimental data describing the sheet buckling parameters were carried out. The obtained results can be used in ACS TP of rolling stands.

Keywords: flatness, plate rolling, mathematical models, buckling, ACS TP.

1. Вступлення

Повышение требований к точности размеров и форме горячекатаных полос и листов продиктовано тем, что все большая часть продукции таких отраслей промышленности, как машиностроение, изготовление стройматериалов и труб, производится на автоматических поточных линиях, нормальное функционирование которых зависит не только от точности толщины, но и ширины и плоскостности поставляемого металла. Таким образом, одним из важнейших качественных показателей проката является плоскостность готовых листов. Целью настоящей работы является исследование математического описания формообразования толстого листа в пространстве применительно к автоматизированной системе управления технологическим процессом толстолистого стана (АСУ ТП ТЛС).

2. Изложение основного материала

Одним из важнейших качественных показателей проката является плоскостность готовых листов. Механизм возникновения неплоскостности раската, как известно, объясняется неравномерностью его вытяжек в различных продольных сечениях по ширине полосы, что приводит к появлению дополнительных напряжений. В зонах повышенного обжатия возникают напряжения сжатия, а в менее обжатых частях полосы – напряжения растяжения. При этом имеются два нейтральных сечения по ширине полосы, в которых отсутствуют дополнительные напряжения, находящиеся примерно на расстоянии $B/4$ от оси полосы, где B – ширина полосы. Величина сжимающих дополнительных напряжений пропорцио-

нальна разности относительных поперечных разнотолщинностей до и после пропуска:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{c_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{c_i}{h_i}, \quad (1)$$

где C_{i-1} , h_{i-1} , C_i , h_i – соответственно поперечные разнотолщинности и толщины раската до i -го пропуска и после него, $\sigma_{\text{доп}}$ – дополнительные напряжения [1, 2].

Если упомянутые дополнительные напряжения превышают некоторую критическую величину, то происходит коробление листа, при этом напряжения существенно уменьшаются или исчезают совсем.

Область получения плоского листа со снижением толщины раската уменьшается. Она обусловлена наличием в системе стана упругих деформаций. Приближенно ее можно описать следующим неравенством [3]:

$$K_k \left(\frac{h_i}{B} \right)^2 < \left(\frac{c_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{c_i}{h_i} \right) < K_c \left(\frac{h_i}{B} \right)^2. \quad (2)$$

Исключение упомянутой неравномерности вытяжек при автоматической прокатке снимает вопрос о короблении листов. Однако рассмотренный принцип управления, как правило, не осуществим из-за ограниченных возможностей оборудования либо из-за неприемлемого удлинения цикла прокатки.

Таким образом, для построения алгоритмов автоматического управления режимами прокатки толстых листов с учетом заданных допусков по плоскостности необходимо математическое описание процесса коробления листов, а именно:

- условий возникновения коробления, то есть моделей фактических дополнительных напряжений $\sigma = f(C, h, B, \text{марка стали}, t)$ и допустимых дополнительных напряжений $\sigma_{\text{доп}} = f(h, B, \text{марка стали}, t)$, где h , B и C – соответственно толщина, ширина и поперечная разнотолщинность полос, t – температура;

- параметров коробления – амплитуды A , длины полупериода волны L , числа полуволн на полосе m , формы волны, ширины участка коробления – и изменения их в процессе прокатки (из-за изменения формы и параметров поперечного сечения полосы) и последующей правки.

В литературе процесс коробления толстых листов освещен недостаточно. В большинстве работ рассмотрены вопросы прокатки с натяжением тонких листов [4], а в работах по прокатке толстого листа теоретические выводы не подтверждаются достаточно достоверными экспериментальными данными, полученными в промышленных условиях [1, 2].

Существует также ряд работ по теории устойчивости пластин [5, 6], выводы которых можно использовать для случая прокатки листов при условии их экспериментального подтверждения. Так, условия закрепления пластин и воздействия на них напряжений, для которых существуют упомянутые теоретические решения, можно лишь предположительно поставить в соответствие реальным условиям коробления при прокатке.

В соответствии с изложенным для решения поставленной задачи и установления применимости (возможно, с корректировкой) эмпирических, а также теоретических зависимостей при описании процесса коробления проведены теоретические и экспериментальные исследования, в том числе эксперименты на толстолистовых станах (ТЛС) 2250, 3600, 2300.

Так, исследования на ТЛС 2250 охватывали процесс прокатки более 130 листов различных геометрических размеров и марок стали. В процессе исследований фиксировались следующие параметры: усилия прокатки (P) и растворы валков (H) по пропускам (по

соответствующим датчикам), номер пропуска (j), в котором начиналось коробление, вид коробления (по краю или середине) и количество полуволн (m) на полосе в различных пропусках (визуально), толщина и ширина полосы в ряде пропусков (по замерам вальцовщика), профиль ненагруженных валков (C^*) (прокаткой алюминиевых прутков), начальные размеры сляба, толщина перед чистовой клетью и конечные размеры листа (по сменному заданию). В пропусках, где полоса была неплоскостной, производилось ее фотографирование сбоку и сверху. На рис. 1 в качестве примера приведена одна из масштабных фотографий неплоскостной полосы, которые использовались для исследований связи параметров коробления с параметрами прокатки. Масштаб геометрических параметров полосы на photographиях устанавливался по размерам линеек манипуляторов, которые попадали в кадр.



Рис. 1. Одна из масштабных фотографий неплоскостной полосы, которые использовались для исследований связи параметров коробления с параметрами прокатки

После окончания прокатки на ножницах поперечной резки от полосы отрезались образцы, толщина которых в различных точках замерялась микрометром. По раствору валков, усилию прокатки и профилю ненагруженных валков с использованием известных модулей клетки и валковой системы были рассчитаны толщины полос и поперечные разнотолщинности после каждого пропуска.

Условия возникновения коробления устанавливались по параметрам раската и процесса прокатки, соответствующим факту появления волнистости полосы. Прежде всего определена верхняя граница области упомянутых параметров h^* , в пределах которой наблюдается коробление (для характерных представителей всего сортамента стана 2250 на полосах толщиной свыше 15 мм коробление отсутствует). Очевидно, существование определенных h^* для других объектов обуславливает целесообразность ведения управления плоскостностью при толщине $h < h^*$. Если ширина прокатываемых листов B на стане изменяется в широком диапазоне, то целесообразно определение $h^* = h^*(B)$.

Для управления плоскостностью или прогнозирования коробления рекомендуется зависимость (2). Невыполнение левого неравенства приводит к короблению краев листа, а

невыполнение правого – к короблению середины.

Коэффициенты $K_k = -80$ и $K_c = 40$ были получены в лабораторных условиях [3]. Для проверки применимости зависимости (2) и уточнения K_k и K_c по экспериментальным данным в координатах $\left(\frac{h_i}{B}\right)^2$ по оси X и $\left(\frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i}\right)$ по оси Y были построены точки, которые соответствовали факту получения ровной либо покоробленной полосы (рис. 2). В результате в плоскости (X, Y) образовались две области точек, которые можно отделить одну от другой прямыми, проведенными из начала координат с угловым коэффициентом $\frac{Y}{X}$ в диапазоне (81–82), что практически совпадает с приведенными в работе [3] ($K_k = -80$).

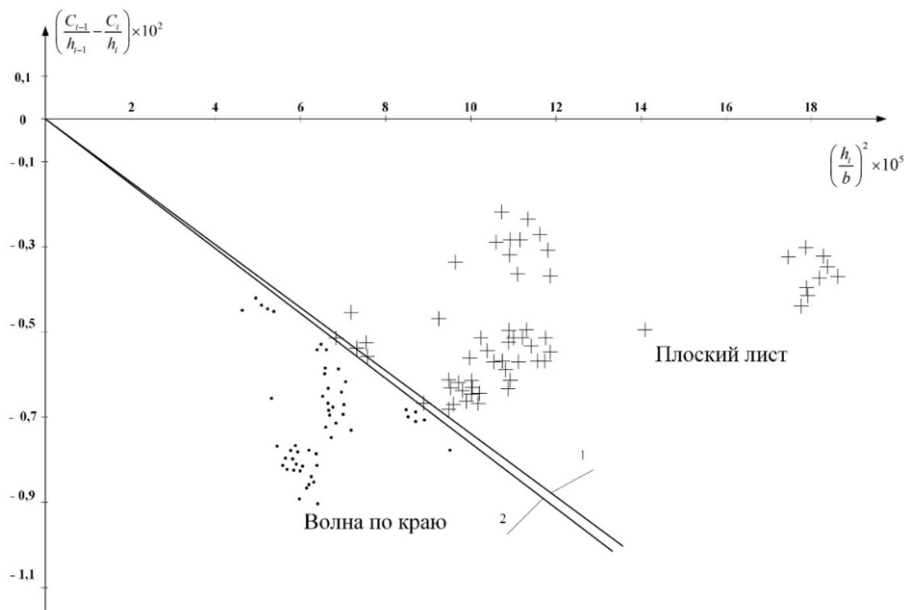


Рис. 2. Критическое рассогласование относительных поперечных разнотолщинностей, приводящее к неплоскостности (волне по кромкам):
1 – по данным исследований, 2 – по данным источников

Таким образом выражение (2) с уточненными коэффициентами K_k и K_c по экспериментальным данным применимо для определения условий коробления в алгоритмах управления прокаткой.

При описании параметров коробления в теории устойчивости пластин [5, 6], а также в ряде работ по плоскостности тонких листов [4] принято, что волна имеет форму, близкую к синусоидальной. На рис. 3 представлены листы с волнистостью по краю и по середине. В соответствии с принятой на этом рисунке системой координат (при рассмотрении в обоих случаях неплоскостного участка общей ширины L_x) поверхность неплоскостного участка полосы описывается синусоидальной функцией [5, 6]:

$$z = A \sin \frac{\pi y}{L_y} \sin \frac{\pi x}{L_x}, \quad (3)$$

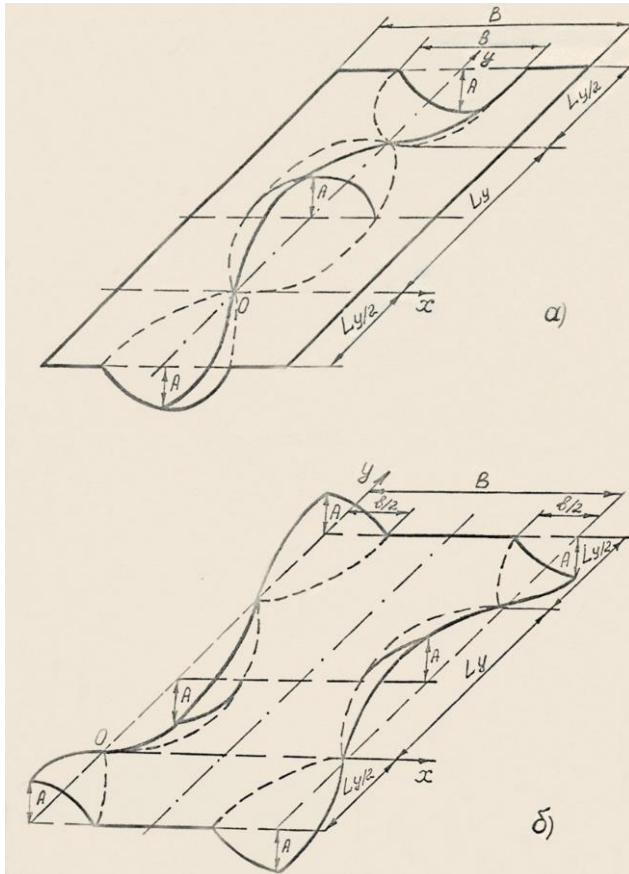


Рис. 3. Листы с волнистостью по середине (а) и по краю (б)

где A – амплитуда, L_y – длина полупериода волны в направлении оси y , L_x – длина полупериода волны в направлении оси x . В направлении оси x всегда образуется одна полуволна. Причем общая ширина неплоскостного участка, как говорилось выше, равна $L_x = \frac{B}{2}$. В дальнейшем будем рассматривать те сечения неплоскостного участка полосы, где амплитуда волны максимальна, то есть среднее продольное сечение листа при короблении середины и боковые кромки листа при короблении по краю. Для этих сечений можно записать:

$$z = A \sin \frac{\pi y}{L_y}. \quad (4)$$

Сравнение экспериментальной кривой формы коробления, полученной по масштабным фотографиям неплоскостных раскатов, с теоретической (синусоидальной) характеризуется максимальными отклонениями не более 7% от измеряемой величины, что

подтверждает целесообразность представления формы волны в виде синусоиды. Неравномерность вытяжек по ширине определяется соотношением длин раската по его краю или середине и в нейтральном сечении, где отсутствуют дополнительные напряжения, вызванные указанной неравномерностью. Соответственно при управлении плоскостностью необходимо иметь математическое описание поперечного профиля полосы, которое позволит рассчитать толщину раската в нейтральном сечении, находящемся на расстоянии $B/4$ от вертикальной оси поперечного сечения.

Поперечный профиль полосы в [3] описывается квадратичной параболой вида

$$h_x = h + C - \frac{4C}{B^2} x^2, \quad (5)$$

где x – расстояние от вертикальной оси поперечного сечения полосы, h – толщина края листа, C – поперечная разнотолщинность (разница толщин середины и края листа).

Переходя от толщины к разнотолщинности:

$$C_x = C - \frac{4C}{B^2} x^2, \quad (6)$$

где C_x – разность толщин в сечении x и края листа.

При этом начальный профиль валков – цилиндрический, а профиль межвалкового зазора в процессе прокатки при равномерном износе валков определяется наложением двух парабол: теплового профиля и прогиба валков от усилия прокатки [7].

Для подтверждения применимости (5), (6) прежде всего экспериментально установ-

лено наличие описанных выше условий на рассматриваемом объекте, где проводились исследования. Была проведена идентификация экспериментальной кривой поперечного профиля (определялся по измерениям образцов) и выражений (5), (6), которая проводилась сравнением измеренных и расчетных значений C_x . В результате статистической обработки отклонений экспериментальных данных от расчетных для различных продольных сечений установлено, что погрешности расчетов по (5), (6) характеризуются средней ошибкой 0,01 мм и средним квадратичным отклонением не более 0,02 мм.

Погрешность определения толщины в нейтральном сечении по формуле (5) определяется при автоматическом управлении прокаткой плоскостного листа погрешностями прогнозирования (реализации) толщины края листа и поперечной разнотолщинности, а также погрешностью собственно математической модели поперечного профиля (6). С учетом расстояния от вертикальной оси поперечного сечения полосы до ее нейтрального сечения, равного $x = B/4$, средняя квадратическая погрешность определения толщины в нейтральном сечении без учета систематической погрешности модели (5) составит

$$\sigma_{hn} = (\sigma_h^2 + \sigma_{расч}^2 + (0,75\sigma_c)^2)^{1/2}, \quad (7)$$

где σ_h и σ_c – соответственно средние квадратические отклонения прогнозирования (реализации) толщины по краю и поперечной разнотолщинности, которые в свою очередь определяются точностью прогнозирования усилия прокатки и модулей растяжения клетки и валковой системы, $\sigma_{расч}$ – среднее квадратическое отклонение расчета C_x по модели (6), которое определено выше по экспериментальным данным.

Расчеты для стана 2250 показывают, что вычисление погрешности σ_{hn} без учета $\sigma_{расч}$ меняет результат менее, чем на 1%. Еще меньше влияет на погрешность определения толщины в нейтральном сечении систематическая погрешность модели (6). Таким образом, указанными ошибками модели (6) можно пренебречь, а формулы (5), (6) целесообразно использовать для описания поперечного профиля полосы при автоматическом управлении плоскостностью листа.

Для определения длины полупериода волны после окончания прокатки L_N была использована теория устойчивости пластин [5, 6], где длина полупериода волны в момент потери устойчивости составит:

для случая коробления полос по краю

$$L = 0,82b_4 \sqrt{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_k}{\varphi_c}} = 0,41B_4 \sqrt{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_k}{\varphi_c}}; \quad (8)$$

для случая коробления посередине

$$L = 0,7b_4 \sqrt{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_k}{\varphi_c}} = 0,35B_4 \sqrt{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_k}{\varphi_c}}, \quad (9)$$

где b – ширина неплоскостного участка полосы (ширина двух покоробленных краевых участков), которая составляет, согласно [3], половину ширины полосы, $\varphi_k = \frac{E_k}{E}$, $\varphi_c = \frac{E_c}{E}$, E_k – касательный модуль, E_c – секущий модуль, E – модуль упругости.

Поскольку, согласно [6], величина $\psi = \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_k}{\varphi_c}}$ изменяется в пределах от 1 до 0,75 ($\psi = 1$ в случае потери устойчивости в пределах упругости), то для случая деформации полос по краю, который наблюдался в процессе исследований,

$$\frac{L}{B} = 0,29 \div 0,41. \quad (10)$$

Следует отметить, что длина волны, которая образовалась в начале коробления, может увеличиваться с вытяжкой полосы с одной стороны и уменьшаться при увеличении числа волн в связи с возникновением закритической деформации [6]. При эксперименте наблюдалось или постоянное после первичного коробления число волн, или это число удваивалось.

В настоящее время явление закритической деформации полос и особенно за пределами упругости изучено недостаточно. Существующие теоретические методы расчета числа полуволн после закритической деформации громоздки и дают значительные расхождения в результатах. Поэтому целесообразно использовать экспериментальные данные об увеличении числа полуволн после закритической деформации, полученные на объекте, где эти данные будут использованы, или на аналогичном объекте.

С учетом сказанного, в расчетах целесообразно использовать вместо L_N минимальную длину полуволны в последнем пропуске L_{Nmin} для определенного объекта и конкретного сортамента. Итак, необходимо экспериментально подтвердить минимальное значение коэффициента $\left(\frac{L}{B}\right)_{min} = 0,29$.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных путем измерения масштабных фотографий неплоскостных полос (64 полосы низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных марок стали), с доверительной вероятностью 0,997, нижнее значение упомянутого коэффициента составит

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{min}^{эксп} = 0,27.$$

Таким образом, L_{Nmin} целесообразно вычислять по формуле

$$L_{Nmin} = \frac{L_{min} \lambda_{\Sigma}}{K n_{\Sigma}}, \quad (11)$$

где L_{min} – минимальная длина полуволны в момент коробления, которая определяется по формуле $L_{min} = B \left(\frac{L}{B}\right)_{min}^{эксп}$, λ_{Σ} – суммарная вытяжка полосы в пропусках, следующих за короблением, K – максимальная кратность изменения числа полуволн в пропусках после возникновения коробления, n_{Σ} – число пропусков, в которых изменялось количество полуволн.

Максимальная кратность изменения числа полуволн (предварительно принята равной 2) требует дополнительного экспериментального уточнения на конкретном объекте.

Стратегии прокатки плоскостного листа можно разделить на две группы: 1) прокатка с образованием волны в промежуточных пропусках и с последующим уменьшением ее в последнем пропуске до допустимых пределов (определяемых требованиями стандартов

или условиями правки, если она предусмотрена) и 2) прокатка без волны во всех пропусках.

Стратегии первой группы обеспечивают, как правило, высокую производительность. Однако при короблении листов в промежуточных пропусках ухудшается качество поверхности полосы (отпечатки от окалины, веерообразные царапины); при высоких требованиях к состоянию поверхности такие стратегии не применяются.

Ко второй группе относятся стратегии, предусматривающие ограничение неравномерности вытяжек в пределах, не приводящих к короблению листов. При отсутствии противоизгиба валков (или малоэффективном противоизгибе) стратегии этой группы могут существенно ограничивать обжатия в ряде пропусков, вследствие чего увеличивается длительность цикла прокатки.

На ТЛС, как правило, используются стратегии управления плоскостностью листа с образованием волны в промежуточных пропусках и с последующим уменьшением ее в последнем пропуске до допустимых пределов. На рис. 4 эта технология прокатки показана графиками зависимости усилий прокатки $P(h)$ от толщины h прокатываемого листа.

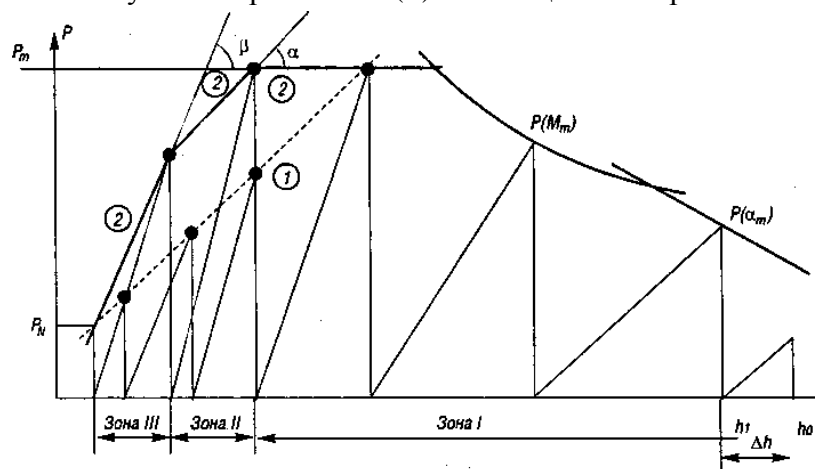


Рис. 4. Графики режима прокатки с управлением формой листа: P – усилие прокатки, P_m и P_N – максимальное и конечное усилия прокатки, $P(M_m)$ – усилие, соответствующее максимальному моменту прокатки, $P(\alpha_m)$ – усилие, соответствующее допустимому углу захвата, h , h_0 , h_1 – толщина текущая, входная и выходная в пропуске, 1, 2 – $P(h)$ идеальная и предельно допустимая для заданной формы листа, α и β – углы наклона, Δh – обжатия

Кривая 1 соответствует идеальному варианту прокатки, когда плоскостность полосы не нарушается во всех пропусках, но при этом необходимо повышенное число пропусков; кривая 2 в зоне I приводит к образованию боковых волн на листе; в зонах II и III эти волны постепенно сводятся к минимуму. Зонам II и III обычно соответствуют 2-3 последних пропусков при толщинах готового листа менее 15-20 мм. Эти зоны обеспечивают более плавный переход от больших к малым усилиям и облегчают подстройку системы к изменяющимся технологическим требованиям.

Рассмотрим случай, когда лист после прокатки подвергается правке [8]. Для выправления полосы при наличии на ней искривленных участков необходимо сообщить ей такой прогиб, чтобы пластическая деформация при изгибе ее на роликах проникла на достаточную глубину.

По условиям правки ограничивающим параметром является радиус кривизны полосы r :

$$r = \gamma h_N, \quad (12)$$

где γ – коэффициент, $\gamma = 10 \div 30$.

Если волнистость полосы, поступающей на правку, удовлетворяет условию (12), то после правильной машины получается плоскостность, соответствующая требованиям стандартов.

Поскольку волнистость полосы близка к синусоидальной форме, то, используя выражение (4), получаем

$$r = \frac{\left[1 + \left(\frac{\pi}{L} A \cos \frac{\pi}{L} l \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{a\pi^2}{L^2} \sin \frac{\pi}{L} l}, \quad (13)$$

где L – длина полупериода волны, A – амплитуда, l – текущая координата.

В [2] получено условие, соблюдение которого обеспечивает после прокатки полосу с неплоскостностью, допустимой по условиям правки. Это условие записывается следующим образом:

$$1,33 \left(\frac{1 + 0,75 \frac{C_N}{h_N}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2}} - 1 \right) \leq \frac{c_{j-1}}{h_{j-1}} \leq \frac{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} - 0,75 \right) \frac{C_N}{h_N} + \sqrt{1 + \left(\frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} - 1}{0,75 \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} \right) \frac{C_N}{h_N} - 0,75 \sqrt{1 + \left(\frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} + 1}, \quad (14)$$

где $j-1$ – индекс пропуска, предшествующего короблению полосы, L – длина полупериода волны на покоробленной полосе, γ – коэффициент, который зависит от возможностей правильной машины, C_N , h_N – заданные значения поперечной разнотолщинности и толщины полосы после прокатки, N – индекс последнего пропуска цикла прокатки.

При выводе условия (14) принималось, что волна имеет форму синусоиды и описывается выражением (4), а поперечный профиль – выражением (6).

Выражение C_{j-1}/h_{j-1} , а также левая и правая части неравенства (14) имеют случайные составляющие, которые определяются погрешностями прогнозирования (реализации) параметров, входящих в них. В связи с этим необходимо ввести соответствующие смещения для левой и правой частей неравенства (14) для обеспечения фактического соблюдения условий прокатки плоскостного листа. Для использования условия (14) необходимо определение длины полупериода волны после окончания прокатки. Для этого следует использовать приведенную выше формулу (11).

Таким образом, согласно полученной зависимости (14), процесс автоматического управления прокаткой с обеспечением плоскостности листа состоит из следующих этапов (рис. 4):

- прокатка без учета условий плоскостности (условия (14)) при толщинах проката, превышающих h^* ;
- соблюдение условия (14) в пропуске, предшествующем короблению;
- прокатка без учета условия (14) после установления факта коробления проката с обеспечением в последнем пропуске заданной поперечной разнотолщинности C_N (при отсутствии информации о возникновении коробления условие (14) соблюдается до конца прокатки).

Реализация описанного выше алгоритма автоматического управления прокаткой

листов с учетом требований к их плоскостности обеспечивается путем введения соответствующих ограничений при выборе обжатий в пропусках или с помощью противоизгиба валков.

Рассмотрим случай, когда после прокатки неплоскостность листа должна удовлетворять требованиям ГОСТ без применения правильной машины, согласно которому неплоскостность оценивается стрелой прогиба поверхности листа от плоскости на длине в 1 метр.

Отклонение поверхности листа от плоскости на длине 1 м определяется по формуле [2]

$$A^* = A \left\{ 1 + \sin \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{L} \left(\frac{2L-1}{2} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

при $L > 0,5$ м,

или

$$A^* = 2A \quad (16)$$

при $L \leq 0,5$ м.

Следовательно, допустимая амплитуда волны по краю или середине листа после прокатки составит

$$A \leq \frac{A_{\text{доп}}^*}{1 + \sin \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{L} \left(\frac{2L-1}{2} \right) \right]} \quad (17)$$

при $L > 0,5$ м и

$$A \leq \frac{A_{\text{доп}}^*}{2} \quad (18)$$

при $L \leq 0,5$ м,

где $A_{\text{доп}}^*$ – допустимое по ГОСТ отклонение поверхности листа от плоскости на длине 1 м.

В [2] показан вывод условия получения после прокатки листа, удовлетворяющего по плоскостности требованиям ГОСТ. При этом использовались выражения (15)–(18). Это условие представляется неравенством

$$1,33 \left(\frac{1 + 0,75 \frac{C_N}{h_N}}{\sqrt{1 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2}} - 1 \right) \leq \frac{C_{j-1}}{h_{j-1}} \leq \frac{\sqrt{1 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} - 0,75 \frac{C_N}{h_N} + \sqrt{1 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} - 1}{0,75 \sqrt{1 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} - \frac{C_N}{h_N} - 0,75 \sqrt{1 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} + 1}. \quad (19)$$

При выводе условия (19) принималось во внимание, что волна имеет форму синусоиды и описывается выражением (4), а поперечный профиль – выражением (6). Процесс автоматического управления прокаткой с обеспечением плоскостности листа при использовании условия (19) аналогичен описанному выше для условия (14).

Управление профилем и формой листа является, таким образом, комплексной проблемой, для решения которой используются как средства автоматического контроля и регулирования технологических параметров, так и различные исполнительные органы, которыми оснащается прокатный стан [2, 9]. При наличии таких органов задача АСУ ТП состоит в реализации соответствующих воздействий на величину и форму раствора нагруженных валков стана. На ТЛС для получения плоского листа в АСУ ТП при прокатке особо тонких (5–7 мм) и широких (> 3м) листов не всегда удается ограничиться только автоматическим управлением профилем и формой листа. Приходится предусматривать вмешательства оператора, который визуально оценивает появление волнистости листа и вносит коррекцию в работу автоматики.

Взаимодействие автоматизированной системы управления прокаткой и оператора организовано следующим образом. Перед началом прокатки у оператора на экране дисплея отображаются выбранная стратегия управления и предполагаемые результаты управления. С учетом имеющегося опыта, а также дополнительной информации о процессе прокатки, оператор может корректировать первоначальную стратегию (например, величину h^* , значение C_N и др.). Он может вводить в систему оценки тех параметров, состояние которых не измеряется автоматизированными средствами (например, появление или исчезновение волны по краям или по центру полосы). Расчет и реализация управлений производится автоматически, но в процессе управления оператор может проводить коррекцию управлений, рассчитанных системой. Если эти изменения не привели к ухудшению качества проката, они учитываются системой при автоматическом управлении прокаткой следующих заготовок того же сортамента.

3. Выводы

Исследован вопрос обеспечения условий прокатки плоскостного листа. Проведены теоретический анализ и идентификация по экспериментальным данным математических моделей, описывающих параметры деформации листа (форму и длину волны, поперечный профиль полосы) и условия возникновения коробления, приведенные в работах по прокатке с натяжением или по теории устойчивости пластин. Установлена применимость (в некоторых случаях с корректировкой) этих моделей для условий прокатки толстого листа. Описано взаимодействие автоматизированной системы управления прокаткой и оператора стана при прокатке плоскостного листа. Полученные результаты могут быть использованы в АСУТП ТЛС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Математическое описание формообразования толстого листа в алгоритмах автоматического управления прокаткой / В.И. Архангельский, В.П. Твардовский, Н.Г. Иевлев [и др.] // Технология легких сплавов: Научно-технический бюллетень. – М.: Всесоюзный институт легких сплавов. – 1981. – № 4. – С. 65 – 69.
2. Ієвлев М.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів / М.Г. Ієвлев, Г.Г. Грабовський. – К.: Техніка, 2001. – 248 с.
3. Shohet K.N. Flatness control in plate rolling / K.N. Shohet, N.A. Townsend // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1971. – N 10. – P. 769 – 775.
4. Тимошенко Э.В. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке / Э.В. Тимошенко, А.А. Самецкий. – К.: НПК «КИА», 1999. – 364 с.
5. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / Тимошенко С.П. – М.: Наука, 1971. – 807 с.
6. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / Вольмир А.С. – М.: Наука, 1967. – 985 с.
7. Кухта Ю.Б. Совершенствование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных полос на основе моделирования работы валковой системы «кварто»: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук / Ю.Б. Кухта. – Магнитогорск, 2009. – 21 с.
8. Архангельский В.И. Задачи и принципы построения алгоритмов АСУ режимами обжатий толстолистовых станков // Автоматизированные системы управления технологическими процессами в прокатном производстве / В.И. Архангельский, В.П. Твардовский, Н.Г. Иевлев. – К.: Институт автоматизации, 1978. – С. 72 – 83.
9. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 59 – 64.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2017