

УДК 621.771.01

Сатонин А. В.
Чуруканов А. С.
Картавенко А. С.
Никишин С. М.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ И ПОЛОС

В настоящее время актуальной задачей, стоящей перед современным машиностроением, является повышение качества выпускаемой продукции за счет повышения точности готового проката, снижение металлоемкости продукции и качества поверхности раската. Основной тенденцией современного направления в совершенствовании листового металлопроката выступает контроль за толщиной раската на выходе из клетки. Данное направление характеризуется разработкой технологических и конструктивных мероприятий по совершенствованию всего комплекса металлургического оборудования, участвующего в процессе формирования раската на всех стадиях производства. Основными показателями качества по точности листового проката, обеспечение которых представляет наибольшие трудности, являются отклонения от номинальной толщины и постоянство толщины по длине и ширине (продольная и поперечная разнотолщинность). Снижение уровня продольной и поперечной разнотолщинности влечет за собой не только повышение экономических показателей предприятия – увеличение объемов выпуска готовой продукции, но также влияет на уровень механических свойств готового листа, поскольку это оказывает существенное влияние на анизотропию. Выполнение мероприятий, направленных на улучшение качества горячекатанного листа, неуклонно влечет за собой повышения уровня конкурентоспособности выпускаемой предприятием продукции.

В мире наблюдается тенденция развития ТЛС. Это связано с применением толстого горячекатаного листа в различных отраслях промышленности, в основном в сварных конструкциях. Одним из видов повышения качества выпускаемого листа является строгий контроль за его продольной разнотолщинностью. Поскольку в процессе прокатки наблюдаются различные процессы механического динамического, а также кинематического характера, в конечном итоге нарушающих качество выпускаемого листа, необходимо в процессе прокатки использовать оперативные методы контроля за межвалковым зазором. Наиболее эффективным методом, является использование гидравлических нажимных устройств (ГНУ). Этот метод является эффективным еще и потому, что позволяет автоматизировать процесс работы ГНУ, а также отличается большим быстродействием по сравнению с другими методами оперативного регулирования межвалкового зазора.

Целью работы является разработка математической модели по расчету энергосиловых параметров процесса горячей прокатки и основных показателей качества относительно толстых горячекатаных листов, при регулировании конечной толщины листа при помощи ГНУ, а также динамических характеристик системы ГНУ.

В самом общем случае условий реализации процессов горячей прокатки относительно толстых листов точность геометрических характеристик зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются исходная разнотолщинность подката Δh_0 , размах изменения величины предварительного межвалкового зазора ΔS_0 , обусловленного радиальными биениями рабочих и опорных валков, их температурными деформациями, погрешностями обработки нажимных механизмов и т. д., а также размах стохастических изменений ширины Δb , показателей механических свойств $\Delta \sigma_s$, температуры Δt_0 и скорости ΔV_1 прокатки,

коэффициентов внешнего трения Δf_0 [1]. Аналитически величину продольной разнотолщинности можно представить в виде дифференциального уравнения, вытекающего из известной зависимости Головина – Симса [2]:

$$dh_1 = dS_0 + dP / G_{кл}, \quad (1)$$

где dS_0 – колебание межвалкового зазора; dP – колебание силы прокатки; $G_{кл}$ – обобщенное значение модуля жесткости рабочей клетки, принимаемое условно постоянным.

Сила прокатки является функцией следующих величин:

$$P = f(h_0, h_1, R, b, \sigma_s, f_0, t_0, V_1), \quad (2)$$

где h_0, h_1 – начальная и конечная толщина листа; R – радиус рабочего вала; b – ширина листа; σ_s – истинный предел текучести прокатываемого материала; f_0 – коэффициент трения установившегося процесса прокатки; t_0 – температура листа; V_1 – скорость прокатки.

Полный дифференциал (2) равняется:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial h_0} dh_0 + \frac{\partial P}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial P}{\partial R} dR + \frac{\partial P}{\partial b} db + \frac{\partial P}{\partial \sigma_s} d\sigma_s + \frac{\partial P}{\partial f_0} df_0 + \frac{\partial P}{\partial t_0} dt_0 + \frac{\partial P}{\partial V_1} dV_1. \quad (3)$$

Подстановкой уравнения (3) в выражение (1) и алгебраических преобразований получается основное уравнение продольной разнотолщинности листа для толстолистовых станов [2]:

$$dh_1 = \frac{1}{G_{кл} - \frac{\partial P}{\partial h_1}} \left(G_{кл} dS + \frac{\partial P}{\partial h_0} dh_0 + \frac{\partial P}{\partial R} dR + \frac{\partial P}{\partial b} db + \frac{\partial P}{\partial \sigma_s} d\sigma_s + \frac{\partial P}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial P}{\partial t_0} dt_0 + \frac{\partial P}{\partial V_1} dV_1 \right). \quad (4)$$

Из анализа технологических факторов следует, что на продольную разнотолщинность прежде всего влияет изменение силы прокатки δP . Главной причиной изменения силы прокатки являются колебания среднемассовой температуры слябов и ее изменение по длине сляба.

Продольную разнотолщинность охарактеризуем следующими показателями [3] (рис. 1):

– максимальная разнотолщинность Δh_M – разность между максимальным и минимальным значениями толщины листа по его длине;

– монотонное увеличение толщины от переднего конца полосы к заднему Δh_K , происходящее вследствие постепенного снижения температуры (A_{t00}), увеличения предела текучести прокатываемого материала ($A_{\sigma s00}$) и монотонное увеличение толщины от переднего конца листа к заднему (A_{h00});

– разнотолщинность Δh_T – разность между значениями толщины в месте контакта сляба с водоохлаждаемыми глиссажными трубами (максимум) и ближайшим по длине листа минимальным значением толщины, происходящее вследствие снижения температуры в местах контакта (A_{t01}) и увеличения исходной толщины (A_{h01}) и предела текучести подката в местах контакта ($A_{\sigma s01}$).

В соответствии с указанным выше, оценить продольный профиль листа можно следующими аналитическими зависимостями:

$$\begin{aligned} h_{0j} &= h_{0\min} + A_{h00} \frac{X_j}{L_{00}} + A_{h01} \sin \left(2\pi \frac{X_j}{L_{01}} \right); \\ t_{0j} &= t_{0\max} + A_{t00} \frac{X_j}{L_{00}} + A_{t01} \sin \left(2\pi \frac{X_j}{L_{01}} \right); \\ \sigma_{s0j} &= \sigma_{s0\min} + A_{\sigma s00} \frac{X_j}{L_{00}} + A_{\sigma s01} \sin \left(2\pi \frac{X_j}{L_{01}} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Как уже было отмечено ранее, одним из наиболее эффективных способов устранения продольной разнотолщинности является применение ГНУ, предназначенных для точной установки валков в процессе автоматического регулирования толщины листа. Для этого необходимо знать силу прокатки, которая изменяется по длине листа, в данный момент времени, для определения текущего межвалкового зазора. Для определения силы прокатки P_j в каждый момент времени воспользуемся методикой расчета энергосиловых параметров процесса горячей прокатки, основанной на результатах теоретических исследований, проведенных на основе метода полей линий скольжения [4].

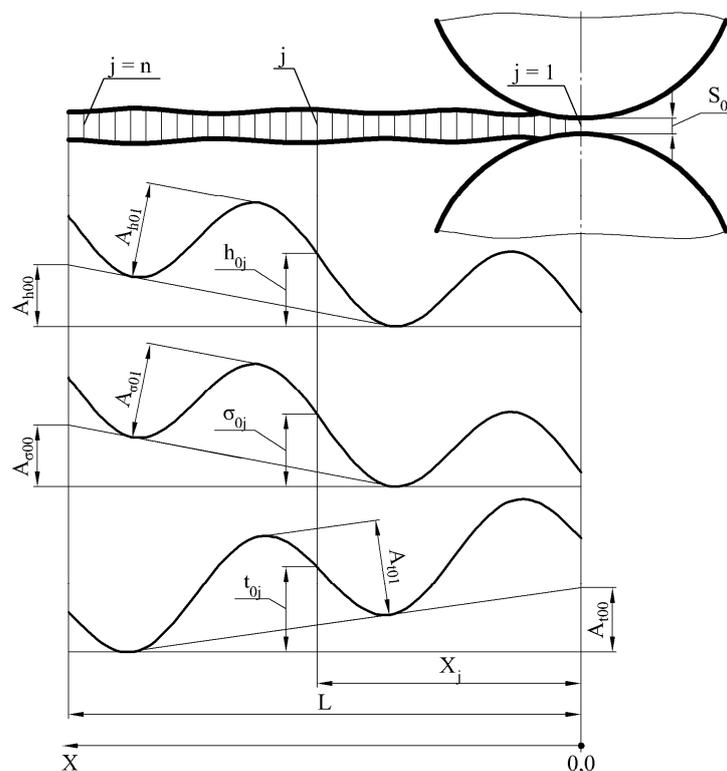


Рис. 1. Схема продольной разнотолщинности листа

С целью определения локальных, т. е. текущих по координате x (см. рис. 1) характеристик осуществим разбиение всей протяженности листа на n элементарных объемов, а также граничные сечения с порядковыми номерами $i = 1 \dots (n+1)$. При этом начало геометрической координаты x имеет место в сечении соответствующем переднему концу листа, а отсчет порядковых номеров осуществляется от начального до конечного сечений, т. е. в направлении противоположном перемещению прокатываемого листа.

Исходя из известного текущего значения геометрической координаты x_i с учетом известных для каждого сечения изменяющихся по величине факторов, влияющих на продольную разнотолщинность, могут быть определены текущие по длине листа значения всех параметров процесса прокатки, которые необходимо знать для расчета нового значения межвалкового зазора для каждого сечения.

Определив текущую силу прокатки, из зависимости (1) с последующим итерационным решением по критерию обеспечения необходимой точности регулирования, находим необходимое текущее значение межвалкового зазора (рис. 2):

$$S_{0j} = h_1 + P_j / G_{кл}, \quad (6)$$

где S_{0j} – текущее по длине листа значение межвалкового зазора; P_j – текущее по длине листа значение силы прокатки; h_1 – номинальная толщина листа после прокатки; $G_{кл}$ – модуль жесткости рабочей клетки.

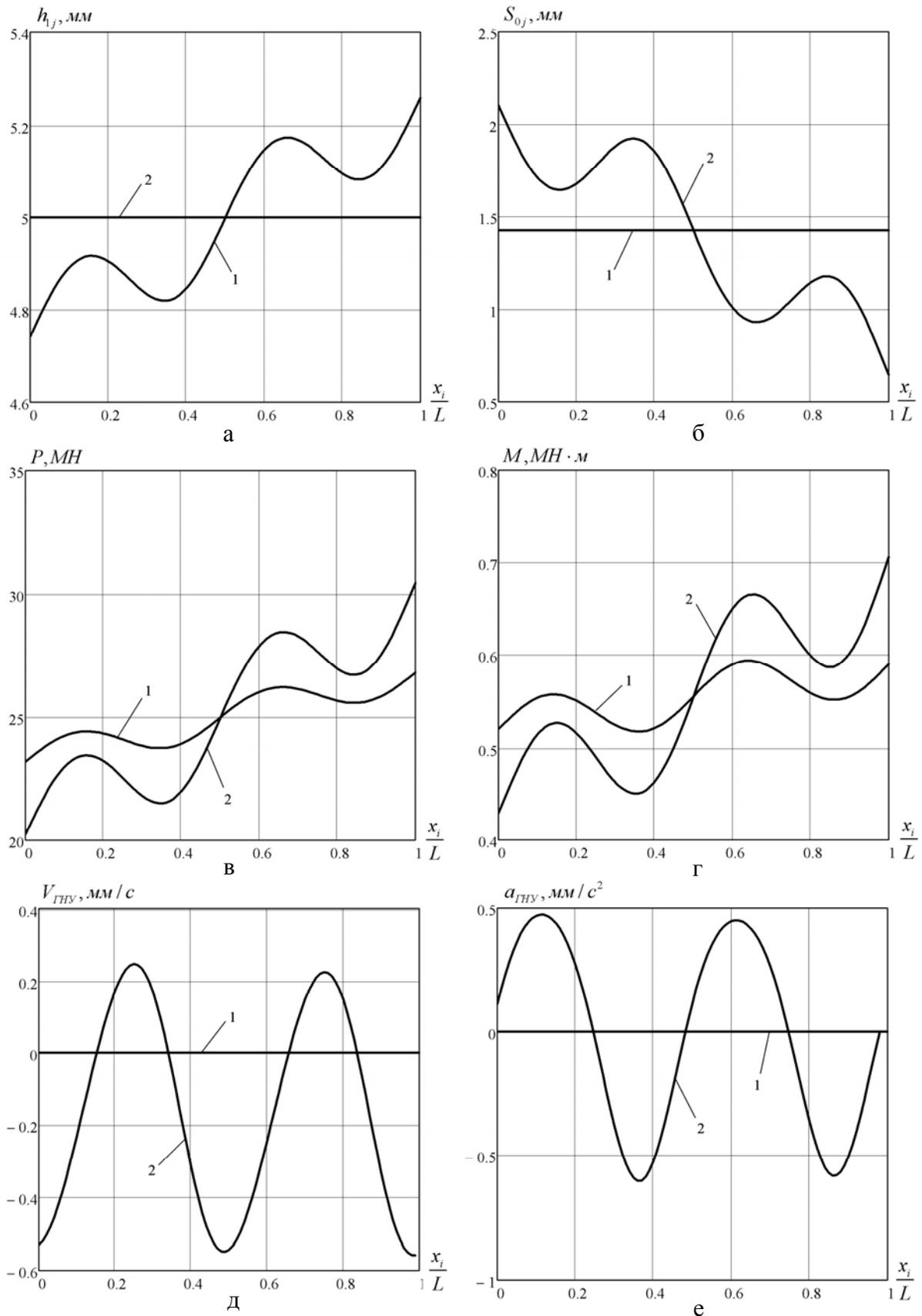


Рис. 2. Текущие параметры прокатки: толщина листа после прокатки h_{1j} (а), значение межвалкового зазора S_{0j} (б), сила P_j (в) и момент M_j (г) прокатки, скорость $V_{j\text{ГНУ}}$ (д) и ускорение $a_{j\text{ГНУ}}$ (е) гидравлического нажимного устройства по длине прокатываемого листа без регулирования (1) и при регулировании (2) толщины

Однако изменение исходной толщины подката в сторону увеличения при одновременном уменьшении межвалкового зазора приводит к значительному увеличению силы прокатки, ее максимальное значение может превышать номинальное на 20–30 %, а также к повышению требований к динамическим характеристикам системы ГНУ (см. рис 2).

Поэтому следует снижать степень регулирования разнотолщинности до оптимальных силовых параметров рабочей клетки стана и скоростных характеристик системы ГНУ (см. рис. 2), при обеспечении требуемых абсолютного Δh_1 и относительного $\delta h_1 = (|\Delta h_1| / h_1) 100\%$ показателей продольной разнотолщинности получаемых горячекатаных листов. Также, увеличение силы прокатки, приводит к увеличению прогиба рабочих валков, возникающего вследствие упругой деформации валковой системы, что приводит к появлению поперечной разнотолщинности, которая определяется активной образующей профиля валков при прокатке. Это делает необходимым применение принудительного изгиба валков, усилиями, приложенными к шейкам рабочих валков.

ВЫВОДЫ

Представлена математическая модель по расчету локальных по длине листа энергосиловых параметров процесса горячей прокатки, а также основных показателей качества относительно толстых горячекатаных листов. Показано влияние доминирующих факторов, влияющих на продольную разнотолщинность листов, исходной продольной разнотолщинности Δh_0 , а также размахов стохастического изменения температуры Δt_0 и напряжений текучести $\Delta \sigma_s$ на энергосиловые параметры процесса горячей прокатки, а также на динамическим характеристикам системы ГНУ при регулировании конечной толщины листа при помощи оперативных методов контроля за межвалковым зазором.

Однако получение листов с минимальной продольной разнотолщинности, вместе с тем, приводит к снижению его плоскостности, что в свою очередь требует использования целого ряда дополнительных научно-обоснованных технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рокотян С. Е. Теория прокатки и качество металла / С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1981. – 223 с.
2. Меерович И. М. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Классен. – М. : Металлургия, 1969. – 262 с.
3. Коновалов Ю. В. Повышение точности листовой прокатки / Ю. В. Коновалов, Д. П. Галкин, В. Г. Додока. – М. : Металлургия, 1978. – 296 с.
4. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос / В. Ф. Потапкин. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – 316 с.

Сатонин А. В. – канд. техн. наук, проф. ДГМА;
Чуруканов А. С. – аспирант ДГМА;
Картавенко А. С. – студент ДГМА;
Никишин С. М. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua