

УДК 621.771.06

Сатонин А. В.
Настоящая С. С.
Картавенко А. С.

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Перед современной металлургией Украины остро стоит вопрос о повышении качества и сортамента производимого листового проката и при этом с минимальными затратами. Данная проблема характерна и для производства горячекатаных листов и полос малой толщины. Качество производимой продукции не отвечает мировым стандартам. Один из способов его решения – это применение асимметричной прокатки и полная автоматизация производства.

Существует большое количество методик для расчета энергосиловых параметров прокатки, которые можно применить для автоматизации производства горячекатаных листов. Так, инженерный метод расчета технологических схем процесса прокатки относительно простой и, как следствие, имеет минимальную трудоемкость численной реализации. Основным недостатком данного метода является большая неточность получаемых результатов. Кроме того, существуют такие методики как конечно-разностный метод, основанный на рассмотрении каждого выделенного элементарного объема; методика В. Ф. Потапкина, основанная на полях линий скольжения; методика Целикова; численно-рекуррентный метод и многие другие. С помощью этих методик можно составить математические модели, позволяющие рассчитать величину силы прокатки P в зависимости от геометрических параметров очага деформации, скорости и температуры прокатки, сопротивления деформации и реологических свойств прокатываемых сталей и степени кинематической асимметрии K_v . Тем не менее, для практического применения важно не столько знание величины силы прокатки P , сколько степени рассогласования скорости прокатных валков K_v , необходимой для поддержания силы P постоянной. Но из-за длительности расчета использование данных методик на практике невозможно.

Целью работы является разработка максимально достоверной математической модели работы систем автоматизированного регулирования широкополосных станов горячей прокатки, использование которой имело бы место в масштабах реального времени.

Для решения поставленных задач использовалось численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условия статического равновесия выделенного элементарного объема зоны пластического формоизменения металла, дополненное учетом инерционной составляющей. Помимо собственно рекуррентного решения, рассматриваемая математическая модель процесса горячей прокатки включала в себя еще ряд процедур, а именно [1–3]:

– расчет геометрических и силовых параметров для зоны упругого восстановления полосы на выходе из очага деформации, обеспечивающий определение расчетных значений напряжений переднего натяжения;

– итерационную процедуру по расчету протяженностей зон опережения на контактных поверхностях, обеспечивающих равенство расчетных заданных значений напряжения переднего натяжения;

– численное интегрирование полученных локальных характеристик напряженного состояния металла, имеющее своей целью определение силы и моментов процесса прокатки;

– итерационную процедуру по учету упругого сплющивания рабочих валков и полосы.

Реализация численного подхода позволяет прогнозировать и такие важнейшие показатели, какими являются распределения конечной толщины, энергосиловых параметров и результирующих механических свойств непосредственно по длине прокатываемых полос. Одновременно с этим возможным является и уточнение исходных данных на проектирование систем автоматического регулирования приводов, а также технологических режимов работы и конструктивных параметров нажимных механизмов полосопрокатных станков, обеспечивающих требуемое качество готовой металлопродукции.

Результаты, полученные на основе этого метода, можно использовать как начальные данные для математической модели, составленной на основе плана Хартли для обработки математических и экспериментальных данных. Такую модель выгодно применять для автоматизации оборудования рабочих клеток непрерывного прокатного стана и увеличения его быстродействия.

На основании всего вышесказанного была составлена математическая модель для широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 1700. Полученная модель позволяет определить величины коэффициентов регрессии и свободного члена регрессионной зависимости для всех типоразмеров листа данной марки стали. Инвентированием относительно K_V можно определить необходимое значение степени рассогласования скоростей прокатных валков.

В производственных условиях данного ШСГП диаметры валков являются постоянными величинами. Скорость прокатки для поддержания высокой производительности обычно принимается максимальной. Условия трения на контактных поверхностях имеют статистический характер и контролю не поддаются. Контролируемыми и регулируемыми являются:

- а) толщина полосы до h_0 и после h_1 прохода, мм;
- б) температура металла в проходе, °С;
- в) базисное сопротивление деформации данной марки стали σ_0 , МПа;
- г) степень кинематической асимметрии:

$$K_V = \frac{V_n - V_e}{V_n},$$

где V_n , V_e – линейные скорости ведущего и ведомого рабочих валков (т. к. обычно нижний валок является ведущим).

Т. о. требуется получить зависимость от 5 факторов. Приведение переменных процесса к безразмерному виду, увеличивающему общность результатов, в данном случае не требуется, поскольку в производственных условиях удобнее оперировать натуральными значениями факторов и откликов.

Известно, что зависимость силы прокатки от основных параметров этого процесса не может быть выражена с достаточной точностью линейной моделью. Можно ожидать, что адекватной окажется модель в виде полинома второй степени. Поэтому необходимо применить план второго порядка.

Для получения полинома второго порядка рекомендуются композиционные симметричные планы [4]. Весьма желательна также ортогональность плана, т. к. в этом случае обеспечивается раздельное оценивание коэффициентов регрессии. Этим условиям соответствует композиционный план Хартли, если в качестве ядра используется ДФЭ 2^{5-1} с генерирующим соотношением не в виде тройного эффекта. Данный план довольно далек от насыщенного (требуется проведение 27 опытов для определения 21 коэффициента модели), но в нашем случае это не имеет значения, поскольку эксперимент математический и число опытов не ограничено. В то же время он рекомендуется для практического использования.

Был выбран план с варьированием факторов на трех уровнях и с генерирующим соотношением $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$. В этом частном случае план Хартли является симметричным [4]. Матрица плана приведена в табл. 1

Таблица 1

Матрица плана Хартли для математического эксперимента при $n = 5$

№ опыта	Факторы					№ опыта	Факторы					№ опыта	Факторы				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
1	+	+	+	+	+	10	+	-	+	+	-	19	-	0	0	0	0
2	-	-	+	+	+	11	+	+	-	-	+	20	0	+	0	0	0
3	-	+	-	-	-	12	-	-	-	-	+	21	0	-	0	0	0
4	+	-	-	-	-	13	-	+	+	-	+	22	0	0	+	0	0
5	-	+	-	+	+	14	+	-	+	-	+	23	0	0	-	0	0
6	+	-	-	+	+	15	+	+	-	+	-	24	0	0	0	+	0
7	+	+	+	-	-	16	-	-	-	+	-	25	0	0	0	-	0
8	-	-	+	-	-	17	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	+
9	-	+	+	+	-	18	+	0	0	0	0	27	0	0	0	0	-

В качестве примера рассмотрели последний проход при прокатке листа из углеродистой стали 3сп размерами 2×1000 мм на НШПС 1700 ММК им. Ильича. Принятые основные уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 2. Разброс толщин h_0 подкатов и температуры металла t был установлен исходя из производственных данных. С целью повышения точности модели разброс толщин готовых листов h_1 был взят несколько большим границ поля допусков. Величина базового сопротивления деформации сталей σ_0 в результате колебаний химического состава может изменяться на 10 % в обе стороны. Максимальную величину степени рассогласования рабочих валков также приняли равной 10 %, чтобы избежать проблем с приводом. Скорость прокатки приняли максимальной – 5 м/с, поскольку речь идет о последнем проходе.

Таблица 2

Данные кодирования факторов (сталь 45, раскат 2×1500 мм)

Факторы	h_0 , мм	h_1 , мм	t , °С	σ_0 , МПа	K_V
Основной уровень	3	2	800	87,4	1,05
Верхний уровень	3,3	2,2	830	96,14	1,1
Нижний уровень	2,7	1,8	770	78,66	1,0
Интервал варьирования	0,3	0,2	30	8,74	0,05

По составленной на основе конечно-разностного метода модели была рассчитана сила прокатки P в каждом из 27 опытов. Затем посредством MathCAD по известным зависимостям [4] найдены величины свободного члена и коэффициентов регрессии как для P , так и для погонной силы P/B . Уравнение регрессии для погонной силы после декодирования имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P/B = & 127,362 + 64,468 \cdot h_0 - 125,144 \cdot h_1 - 0,327 \cdot t + 1,642 \cdot \sigma_0 + 5,17 \cdot K_V - \\
 & - 1,003 \cdot h_0^2 + 15,109 \cdot h_1^2 + 0,00036 \cdot t^2 + 0,001667 \cdot \sigma_0^2 + 29,083 \cdot K_V^2 - \\
 & - 0,822 \cdot h_0 \cdot h_1 - 0,092 \cdot h_0 \cdot t + 0,1 \cdot h_0 \cdot \sigma_0 + 20,981 \cdot h_0 \cdot K_V + 0,082 \cdot h_1 \cdot t - \\
 & - 0,509 \cdot h_1 \cdot \sigma_0 + 24,296 \cdot h_1 \cdot K_V - 0,000574 \cdot t \cdot \sigma_0 - 0,169 \cdot t \cdot K_V - 0,508 \cdot \sigma_0 \cdot K_V.
 \end{aligned}$$

Статистическая обработка в данном случае не имеет смысла, т. к. эмпирические данные являются расчетными. По сути дела это аппроксимация расчетных данных методом наименьших квадратов.

Сравнение рассчитанных по программе, составленной на основе численно-рекуррентного метода и полученных по уравнению регрессии величин P и P/B показало, что максимальная относительная погрешность составляет $-0,198\%$. Т. о. точность аппроксимации достаточна.

Для стабилизации толщины и, т. о. устранения разброса толщин листов в партии необходима обратная зависимость K_V от всех вышеприведенных факторов. Т. к. толщина однозначно определяется силой P , то вначале необходимо определить номинальную силу прокатки P_n (при номинальных значениях остальных параметров). Например, при прокатке листа 2×1500 мм из стали 3сп параметры таковы: $h_0 = 3$ мм; $t = 800$ °С, $\sigma_0 = 87,4$ МПа, $K_V = 1,05$. По декодированному уравнению регрессии получаем: $P_n = 20376,2$ кН. Эту силу нужно поддерживать постоянной, несмотря на изменение остальных параметров. Тогда при выставленной оператором «пружине» для номинального режима всегда будет получаться заданная толщина h_1 . Для того чтобы найти то K_V , при котором $P_n = \text{const}$, уравнение регрессии необходимо инверсировать относительно K_V и, подставив в него остальные параметры данного случая и $P = P_n$, найти требуемую величину рассогласования скоростей валков. Например: $h_0 = 3,3$ мм, $t = 830$ °С, $\sigma_0 = 87,4$ МПа. В результате приходим к квадратному уравнению:

$$AK_V^2 + BK_V + (C - P_n / B) = 0, \quad (1)$$

где $A = b_{55} = 29,083$;

$B = b_5 + b_{15} \cdot h_0 + b_{25} \cdot h_1 + b_{35} \cdot t + b_{45} \cdot \sigma_0 = -61,733$;

$C = b_0 + b_1 h_0 + b_2 \cdot h + b_3 \cdot t + b_4 \cdot \sigma_0 + b_{11} \cdot h_0^2 + b_{22} \cdot h_1^2 + b_{33} \cdot t^2 + b_{44} \cdot \sigma_0^2 + b_{12} \cdot h_0 \cdot h_1 + b_{13} \cdot h_0 \cdot t + b_{14} \cdot h_0 \cdot \sigma_0 + b_{23} \cdot h_1 \cdot t + b_{24} \cdot h_1 \cdot \sigma_0 + b_{34} \cdot t \cdot \sigma_0 = 49,794$.

Т. к. ширина раската 1500 мм, то при номинальных условиях $P/B = 16,677$ кН/мм. Вследствие изменений условий прокатки сила P возросла до 43801,53 кН. Для стабилизации силы прокатки на прежнем уровне подставили $P/B = 16,677$ кН/мм в (1) и решая, нашли два корня: $K_{V1} = 0,928$; $K_{V2} = 1,194$. Первый корень не имеет физического смысла. В соответствие со вторым степень рассогласования скоростей валков следует увеличить до 11,94 %.

При составлении полученной математической модели использовалась расчетная схема, предполагающая прокатку полосы с базовой длиной L_0 , иллюстрирована на рис. 1.

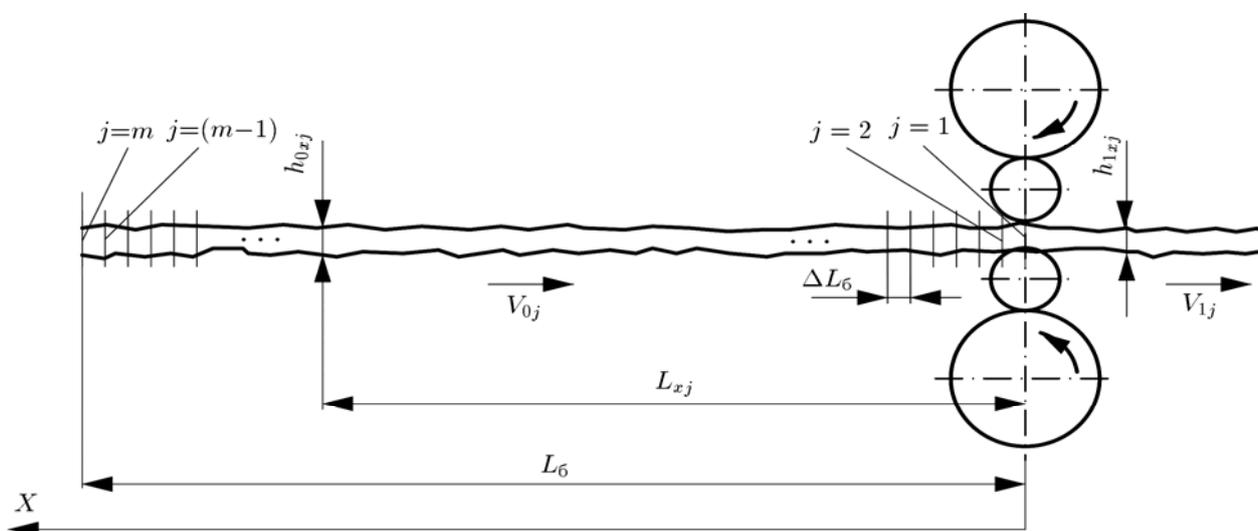


Рис. 1. Расчетная схема к численному математическому моделированию распределений основных показателей качества по длине горячекатаных лент

Осуществив разбиение базовой длины на конечное множество m элементарных длин $\Delta L_{\bar{\sigma}} = L_{\bar{\sigma}} / m$, определим геометрическую координату L_{x_j} для каждого отдельного j -го поперечного сечения прокатываемой ленты:

$$\Delta L_{x_j} = \Delta L_{\bar{\sigma}}(j-1), \quad (2)$$

где $j = 1$ – соответствует начальному сечению, исходные параметры для которого являются номинальными, то есть $x_{ij} \Big|_{j=1} = \bar{x}_i$.

Последующее определение исходных параметров для каждого отдельного j -го поперечного сечения прокатываемой ленты в зависимости от его геометрической координаты L_{x_j} осуществляли на основе линейно-синусоидальных зависимостей вида:

$$h_{0j} = \bar{h}_0 + \delta h_{00} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jh0}} \delta h_{0j} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{h0}); \quad (3)$$

$$S_{0j} = \bar{S}_0 + \delta S_{00} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jS0}} \delta S_{0j} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{S0}); \quad (4)$$

$$b_j = \bar{b} + \delta b_0 L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jb}} \delta b_j \sin(2\pi L_{x_j} / L_{b0}); \quad (5)$$

$$\sigma_{T0j} = \bar{\sigma}_{T0} + \delta \sigma_{T00} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{j\sigma T0}} \delta \sigma_{T0j} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{\sigma T0}); \quad (6)$$

$$f_j = \bar{f}_0 + \delta f_0 L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jf}} \delta f_j \sin(2\pi L_{x_j} / L_{f0}); \quad (7)$$

$$T_{0j} = \bar{T}_0 + \delta T_{00} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jT0}} \delta T_{0j} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{T0}); \quad (8)$$

$$T_{1j} = \bar{T}_1 + \delta T_{10} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jT1}} \delta T_{1j} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{T1}). \quad (9)$$

Или в более обобщенной форме:

$$y_{ij} = \bar{y}_j + \delta y_{ij0} L_{x_j} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{j=1}^{K_{jyij}} \delta y_{ij} \sin(2\pi L_{x_j} / L_{y_{ij}}), \quad (10)$$

где \bar{y}_j – номинальные значения соответствующего исходного параметра;

δy_{i0} – абсолютное значение приращения данного параметра при его изменении на базовой длине по линейному закону;

j – порядковый номер отрезка при разбиении базовой длины $L_{\bar{\sigma}}$ на конечное множество K_{ij} отдельных периодов протяженностью L_{x_i} , соответствующих синусоидальному закону изменения данного исходного параметра;

δy_{ij} – полуразмах изменения соответствующего i -го исходного параметра в рамках данного k -го периода синусоидального закона.

С учетом известного, согласно (3)–(10), комплекса всех исходных параметров для каждого отдельного j -го поперечного сечения прокатываемой ленты производили решение упругопластической «задачи рабочая клеть – прокатываемая лента», определяя тем самым соответствующее значение конечной толщины h_{1j} , а уже на основе известных h_{0j} , h_{1j} (рис. 2) – силы P_j и моментов $M_{1(2)j}$ прокатки [5] с учетом различной отработки ГНУ.

В зависимости от исходных h_{0j} и конечных h_{1j} значений толщины прокатываемой ленты, то есть зависимости от текущего значения степени деформации, производили одновременно и расчет текущих значений показателей механических свойств σ_{t1j} , σ_{b1} и так далее.

Непосредственное решение упругопластической системы «рабочая клеть – прокатываемая» полоса осуществляли на основе метода целенаправленного перебора вариантов, а также на основе метода дихотомии.

В качестве критериальной оценки сходимости итерационной процедуры решения было принято условие эквивалентности расчетного S_{0T} и заданного S_0 значений величины предварительного межвалкового зазора, определяемых на основе известной зависимости Головина-Симса [6]:

$$S_0 = h_1 - P / G_{кл}, \quad (11)$$

где $G_{кл}$ – модуль жесткости рабочей клетки прокатного стана.

В качестве алгоритмического обеспечения самой итерационной процедуры решения использовали метод целенаправленного перебора вариантов:

$$h_{1(t+1)} = h_{1t} + A_{h_1} \text{sign}(S_0 - S_{0t}), \quad (12)$$

где t – порядковый номер очередного цикла итерационного решения;

A_{h_1} – шаг изменения конечной толщины прокатываемой полосы, величина которого

была принята переменной в зависимости от степени приближения к искомому результату;

$\text{sign}(S_0 - S_{0t})$ – функция знака.

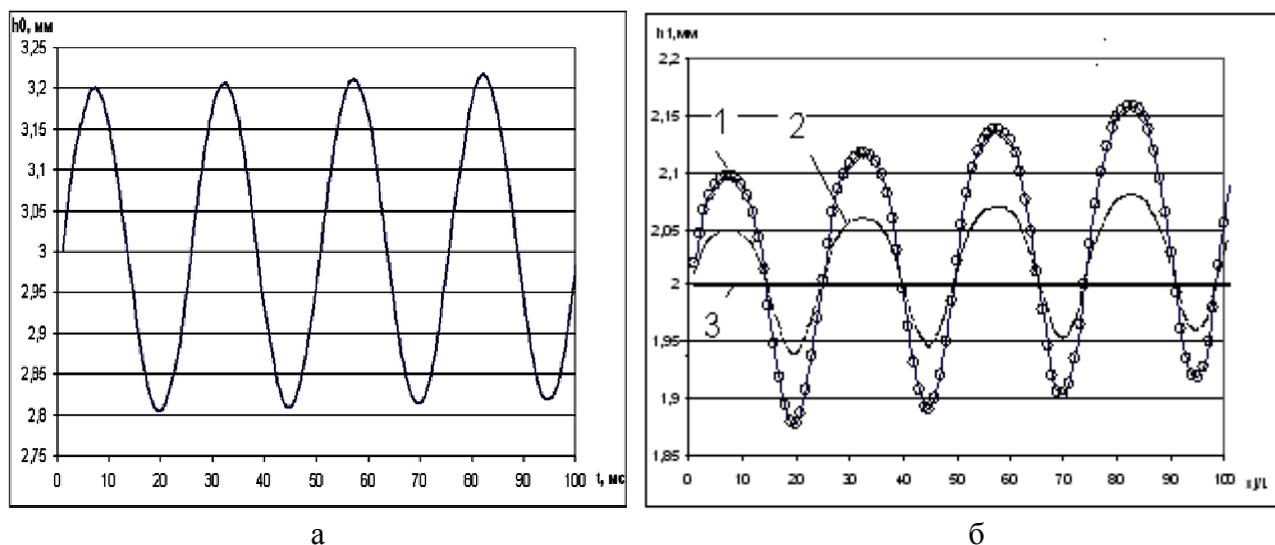


Рис. 2. Расчетные распределения изменения исходной толщины проката (а) и конечной толщины проката (б) при различной отработке САРТ:

1 – 0 % отработка САРТ; 2 – 50 % отработка САРТ; 3 – 100 % отработка САРТ

В качестве начального условия итерационной процедуры решения было принято $h_{1t}|_{t=1} = h_1$, при этом на завершающем этапе величина приращения A_{h_1} , характеризующая погрешность вычислений, соответствовала $A_{h_1} = 10^{-5} h_1$.

С учетом известного комплекса всех исходных параметров для каждого отдельного j -го поперечного сечения прокатываемой полосы производили решение упругопластической задачи «рабочая клеть – прокатываемая полоса», определяя тем самым соответствующее значение конечной толщины h_{1j} , а также силы P_j и моментов $M_{1(2)j}$ прокатки. Графическое изображение полученных результатов представлено на рис. 3.

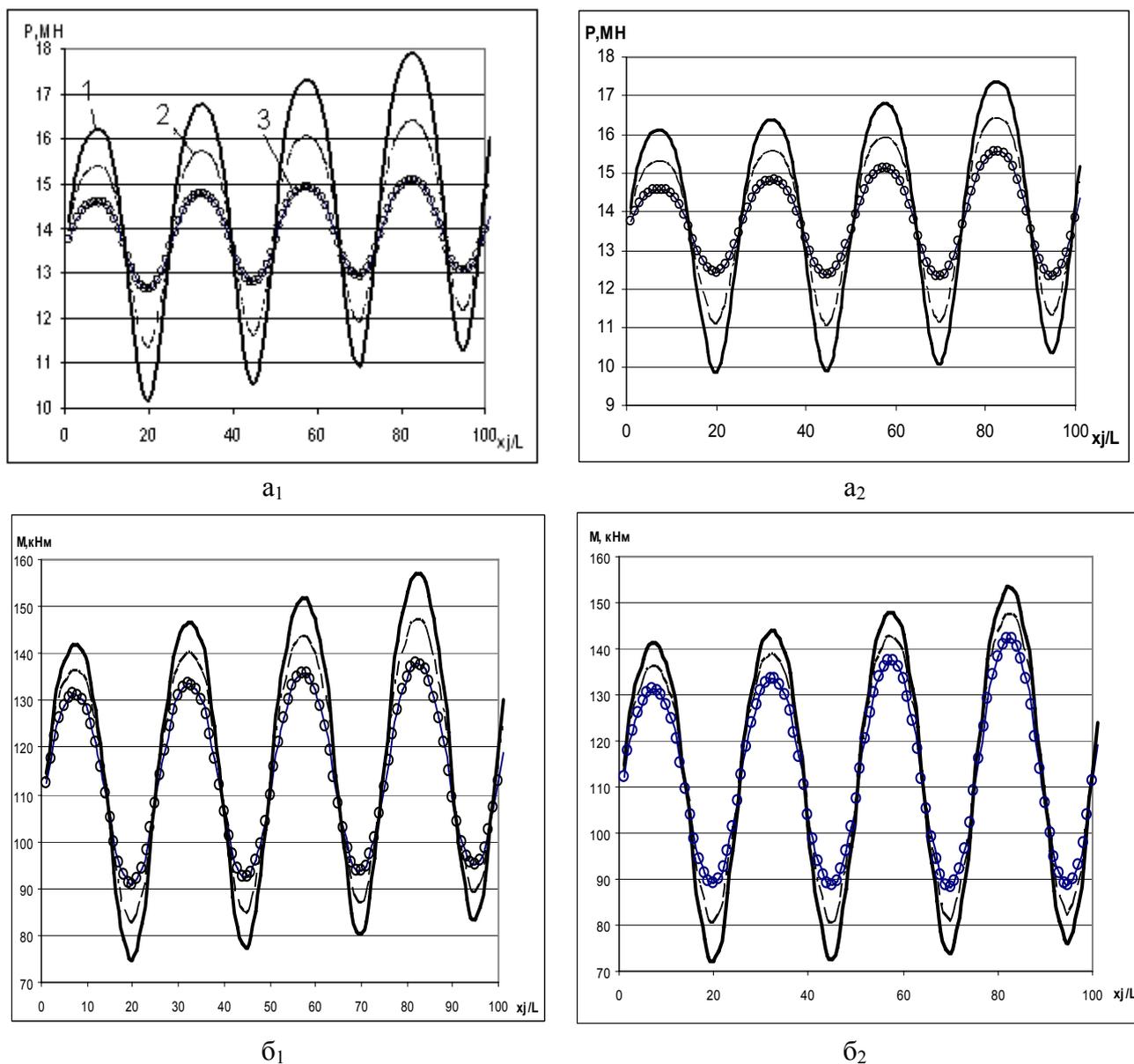


Рис. 3. Расчетные распределения силы (а) и момента (б) прокатки при различных отработках САРТ для симметричной (1) и асимметричной (2) при $Kv = 1,19$ прокатки: 1 – 100 % отработка САРТ; 2 – 50 % отработка САРТ; 3 – 0 % отработка САРТ

Из представленных графических изображений изменения конечной толщины h_{1j} , а также силы P_j и моментов $M_{1(2)j}$ прокатки можно сделать вывод, что 100 % отработка

САРТ приводит к скачкообразному изменению энергосиловых параметров и, соответственно, к ухудшению плоскостности проката. Кроме того, такое явление как температурный клин по длине проката дает эффект линейного возрастания энергосиловых параметров. Но если применить асимметричную прокатку с изменением степени асимметрии по длине раската, то такое повышение силы и момента прокатки можно избежать. Данный вывод был подтвержден математически и его графическое отображение представлено на рис. 3.

ВЫВОДЫ

Представлена математическая модель по расчету локальных и интегральных энергосиловых параметров процесса горячей прокатки, а также основных показателей качества относительно тонких горячекатаных полос. Показано влияние доминирующих факторов, влияющих на продольную разнотолщинность полос – исходной продольной разнотолщинности Δh_0 , а также размахов стохастического изменения температуры Δt_0 , напряжений текучести $\Delta \sigma_s$ и степени кинематической асимметрии K_v на энергосиловые параметры процесса горячей прокатки при регулировании конечной толщины листа при помощи оперативных методов контроля за межвалковым зазором.

На основе теории планирования эксперимента получены аналитические регрессионные зависимости представленной модели, которые позволяют снизить трудоемкость и затраты машинного времени при разовой численной реализации, что весьма проблематично при использовании достаточно сложных математических моделей, применительно к решению целого ряда задач, таких как автоматизированное управление основными показателями качества по точности листового проката, получение листов с минимальными продольной и поперечной разнотолщинностью при обеспечении их высокой плоскостности, что достигается в настоящее время применением гидравлических нажимных механизмов и систем противоизгиба валков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Л. Н. Определение интегральных показателей напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке / Л. Н. Соколов, В. Ф. Потапкин, В. Н. Ефимов и др. // *Металлургия и коксохимия*. – 1987. – Вып. 94. – С. 7–10.
2. Железнов Ю. Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю. Д. Железнов, С. А. Коцарь, А. Г. Абиев. – М. : *Металлургия*, 1974. – 239 с.
3. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Классен. – М. : *Металлургия*, 1969. – 262 с. – с ил.
4. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов. – Киев-Донецк : Вища школа, 1982. – 119 с.
5. Кокотько М. Е. Математическое моделирование геометрических, кинематических энергосиловых параметров процесса холодной прокатки относительно тонких листов на профилированной плите / М. Е. Кокотько, С. К. Добряк, М. В. Федоринов // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 447–451.
6. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : *Металлургия*, 1980. – 320 с.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;

Настоящая С. С. – аспирант ДГМА;

Картавенко А. С. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua