

УДК 621.771

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ И СТОХАСТИЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

А.В. Кожевников, И.А. Кожевникова, Н.Л. Болобанова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»
E-mail: avk7777@mail.ru

Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л. Математическое моделирование процесса холодной прокатки в условиях нестационарности и стохастичности технологических параметров. Разработана динамическая модель процесса холодной прокатки на непрерывном стане, объединяющая модели электромеханической системы, очага деформации и гидронажимного устройства. Представлены результаты статистической оценки точности модели по погрешности расчета силы прокатки. В результате установлено, что более чем в 93 % случаев погрешность расчета не превышает 6 %, максимальная погрешность составила 16,6 %. Математическая модель обеспечивает высокую точность прогнозирования величины и характера изменения силы прокатки с учетом нестационарности и стохастичности технологических параметров.

Ключевые слова: Холодная прокатка, нестационарный процесс, стохастичность параметров, очаг деформации, электромеханическая система.

Общая постановка проблемы

Фундаментом для создания математических моделей процесса прокатки являются положения теории прокатки, основанные на детерминистском подходе. Подобного рода модели позволяют определять точечные значения основных параметров (технологических, геометрических, энергосиловых) на основании фиксированного набора исходных данных без учета их нестационарности и стохастичности.

Рост вычислительных мощностей, наблюдаемый за последние десятилетия, позволил расширить сферу применения динамических моделей на те области, где ранее традиционно использовались исключительно детерминированные модели. Одной из таких областей является технология производства холоднокатаного листа, включая проектирование современных технологий производства специальных марок сталей, настройку и управление оборудованием прокатных станов, прогнозирование качественных характеристик готовой продукции.

Основная цель работы – создание математической модели процесса холодной прокатки, учитывающей стохастичность параметров, нестационарный характер и взаимосвязь процессов, протекающих в линии привода прокатной клетки, валковом узле и очаге

деформации, для исследования влияния указанных факторов на затраты энергии, структуру и механические свойства проката.

Литературно-аналитический обзор

Моделирование динамических процессов, возникающих при непрерывной холодной прокатке, является весьма сложной задачей, поэтому в технической литературе освещаются только ее отдельные аспекты.

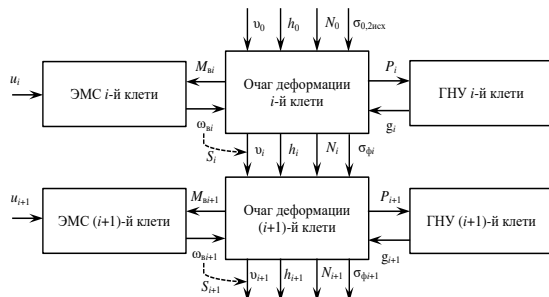
Большинство известных математических моделей процесса холодной прокатки и методов расчета энергосиловых параметров являются детерминистскими [1 – 8], не учитывающими динамический характер его протекания в реальных производственных условиях.

Динамические модели, описанные работах [9 – 11], являются моделями управления процессом, предназначенными для проектирования контроллеров, без прогнозирования напряжений, деформаций и нагрузок в прокатных клетях.

В работе [12] затронут вопрос математического описания электромеханической системы клетки стана холодной прокатки для исследования динамических нагрузок электропривода клетки без учета влияния контактного взаимодействия между полосой и валками.

Описание модели

При разработке математической модели процесса холодной прокатки рассматривались следующие элементы системы непрерывного прокатного стана: очаги пластической деформации с межклетевым промежутком, гидравлические нажимные устройства (ГНУ), электромеханические системы клеток, включающие автоматизированные электроприводы, механические трансмиссии и непосредственно рабочие клетки (рис. 1).



u_i, u_{i+1} – напряжение на якорной обмотке двигателя i -й, $(i+1)$ -й клеток; $\omega_{bi}, \omega_{bi+1}$ – угловая скорость вращения бочки рабочего вала i -й, $(i+1)$ -й клеток; M_{bi}, M_{bi+1} – момент, необходимый для обеспечения процесса прокатки в i -й, $(i+1)$ -й клетки; v_0 – скорость подката; h_0 – толщина подката; v_i, v_{i+1} – скорости полосы на выходе из i -й, $(i+1)$ -й клеток; h_i, h_{i+1} – толщины полосы на выходе из i -й, $(i+1)$ -й клеток; N_0, N_i, N_{i+1} – силы натяжения полосы; P_i, P_{i+1} – силы прокатки в i -й, $(i+1)$ -й клетях; g_i, g_{i+1} – зазоры между рабочими валами i -й, $(i+1)$ -й клеток; $\sigma_{0,2исх}$ – исходный предел текучести материала полосы; $\sigma_{\phi i}, \sigma_{\phi i+1}$ – сопротивление деформации полосы в i -й, $(i+1)$ -й клетки; S_i, S_{i+1} – коэффициенты опережения в i -й, $(i+1)$ -й клетки. Рисунок 1 – Структурная схема математической модели процесса холодной прокатки, учитывающая взаимосвязь электромеханических систем клеток, модель очага деформации и ГНУ.

Модель электро-механической системы имеет две входные переменные: напряжения, подаваемые на якорные обмотки электродвигателей рабочих клеток, и момент необходимый для осуществления процесса прокатки, и одну выходную – угловую скорость вращения бочки рабочего вала.

Модель очага деформации содержит шесть входных переменных и столько же выходных, связывающих ее с соседними клетями через межклетевые промежутки, главным приводом через механическую трансмиссию и ГНУ. Воздействие на напряжение двигателя передается на вход очага деформации через

скорость валков с обратной связью по моменту.

При регулировании толщины полосы по методу Головина-Симса [13] взаимосвязь между очагом деформации и ГНУ осуществляется через силу прокатки и межвалковый зазор. Зазор является входной переменной, позволяющей учитывать внешние возмущения, например, биение бочек валков или управляющие воздействия.

Указанные на рис. 1 переменные задаются с учетом динамики процесса холодной прокатки и стохастичности его параметров. Характеристики прокатываемого металла такие, как предел текучести, показатели упрочнения представляют собой случайные величины, получить действительные значения которых экспериментальным путем весьма затруднительно, поэтому для расчета распределения исходного предела текучести по длине холоднокатаной полосы применен метод Монте-Карло.

Математическая модель очага пластической деформации

Математическое описание очага деформации i -й рабочей клетки основано на упругопластической схеме, в которой полоса рассмотрена как тонкое упругопластическое тело, а валки – как массивные упругие тела [14 – 17].

В соответствии с принятой схемой (рис. 2) очаг деформации состоит из трех участков:

- 1) упругого сжатия полосы длиной x_1 ;
- 2) пластической деформации длиной $x_{пл}$, состоящий из двух зон: отставания длиной x_2 и опережения длиной x_3 ;
- 3) упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_4 .

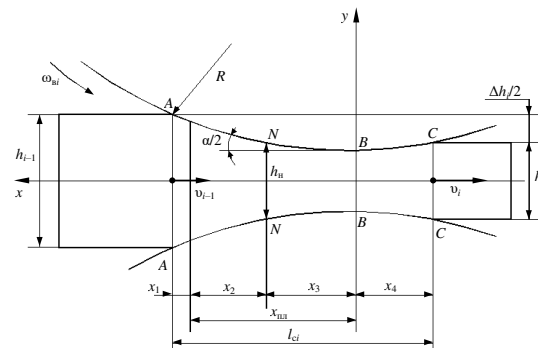


Рисунок 2 – Схема упругопластической модели очага деформации.

Длина очага деформации l_{ci} определяется

по формуле:

$$l_{ci} = x_1 + x_{пл} + x_4.$$

Протяженность второго упругого участка определяется закономерностями упругого сплющивания полосы и рабочего вала, поэтому для ее вычисления используется классическая формула теории упругости – формула Герца:

$$x_4 = 8p_{срi}R \left(\frac{1-\nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1-\nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right),$$

где $p_{срi}$ – среднее значение нормальных контактных напряжений в очаге деформации; R – радиус бочки рабочих валков; ν_B , E_B – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала валков; ν_{II} , E_{II} – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полосы.

Протяженность первого упругого участка и пластического определяется путем аппроксимации контактных поверхностей на соответствующих участках плоскостями и несложных геометрических вычислений:

$$x_1 + x_{пл} = \sqrt{R\Delta h_i + x_4^2},$$

где Δh_i – абсолютное обжатие.

Для описания изменения сопротивления деформации полосы $\sigma_{\phi i}$ в зависимости от степени суммарного обжатия используется формула:

$$\sigma_{\phi i} = \sigma_{0,2исх} + \frac{A}{B+1} \cdot \frac{\varepsilon_{\Sigma i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma i-1}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma i} - \varepsilon_{\Sigma i-1}},$$

где $\sigma_{0,2исх}$ – предел текучести материала полосы в исходном, недеформированном состоянии; A , B – эмпирические величины, определяемые пластическими свойствами стали; $\varepsilon_{\Sigma i-1}$, $\varepsilon_{\Sigma i}$ – частные суммарные относительные обжатия в соответствующих клетях.

В качестве входной переменной в ГНУ в модели использована сила прокатки:

$$P_i = p_{срi} \cdot l_{ci} \cdot b,$$

где b – ширина прокатываемой полосы.

Выходной переменной модели очага деформации в линию электропривода (рис. 1) является момент M_{vi} , необходимый для обеспечения процесса прокатки в i -й клетке:

$$M_{vi} = M_{при} + M_{тр.лi} + M_{отi} + M_{натi},$$

где $M_{при}$ – момент прокатки; $M_{тр.лi}$ – момент трения в подшипниках рабочих валков; $M_{отi}$ – момент, необходимый для вращения холостых опорных валков; $M_{натi}$ – момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений.

Расчет момента прокатки производится по формуле, в которой не применяются эмпирические коэффициенты плеча силы прокатки:

$$M_{при} = \frac{N_{при}}{\omega_{vi}},$$

где $N_{при}$ – мощность прокатки, рассчитываемая с учетом работы прокатки на каждом упругом и пластическом участках очага деформации; ω_{vi} – окружная скорость рабочих валков, подаваемая на вход модели очага деформации от электродвигателя.

Момент трения в подшипниках рабочих валков определяется на основе составления и анализа схемы действия сил и моментов в клетке «кварто» с приводными рабочими валками:

$$M_{тр.лi} = R_{p\Sigma} \cdot \rho_p,$$

где $R_{p\Sigma}$ – сумма горизонтальных сил, действующих на шейки рабочего вала в качестве реакций, возникающих в подушках и подшипниковых опорах под влиянием натяжений полосы и других рабочих нагрузок; ρ_p – радиус круга трения в подшипниках рабочего вала.

Момент, необходимый для вращения холостых опорных валков:

$$M_{отi} = P_{опi} \cdot d_p,$$

где $P_{опi}$ – межвалковая сила, действующая от приводного рабочего вала на холостой опорный валок; d_p – расстояние от оси рабочего вала до линии действия силы $P_{опi}$.

Момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений:

$$M_{натi} = \frac{N_i - N_{i-1}}{2} R,$$

где N_{i-1} , N_i – силы заднего и переднего натяжений полосы.

Задание на скорость входа полосы в $(i+1)$ -ю клетку (v_i) может осуществляться через скоростные параметры предыдущей i -й клетки – угловую скорость вращения рабочих валков ω_{vi} и коэффициент опережения S_i :

$$v_i = (1 + S_i) \cdot \omega_{vi} \cdot R.$$

Коэффициент опережения для очага деформации с одним нейтральным сечением определяется по формуле:

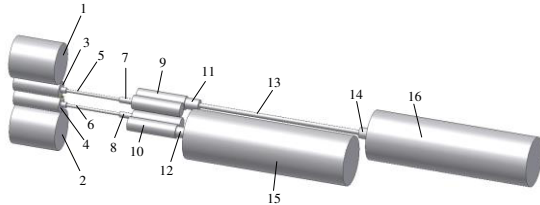
$$S_i = \frac{h_{ni}}{h_i \sqrt{1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}}} - 1,$$

где h_n – толщина полосы в нейтральном сечении.

Математическая модель электромеханической системы

Привод рабочих валков клеток непрерывного стана холодной прокатки является индивидуальным и осуществляется от главных электродвигателей через механическую

трансмиссию, включающую муфты, промежуточные соединения, комбинированный редуктор и шпиндели (рис. 3).



1 – верхний опорный валок; 2 – нижний опорный валок; 3 – верхний рабочий валок; 4 – нижний рабочий валок; 5, 6 – шпиндели; 7, 8 – муфты «редуктор-шпindelь»; 9, 10 – зубчатые зацепления комбинированного редуктора; 11, 12 – муфты предельного момента; 13 – промежуточное соединение; 14 – муфта зубчатая; 15, 16 – электродвигатели постоянного тока

Рисунок 3 – Крутильная колебательная система главной линии клетки.

В практике исследования динамических нагрузок в машинах широко используется подход, основанный на переходе от реального объекта к эквивалентной расчетной схеме [18, 19]. Такая эквивалентная схема главного привода рабочих клеток стана 1700 холодной прокатки представлена на рис. 4.

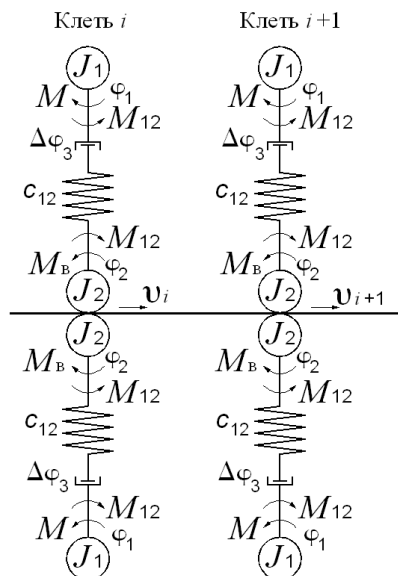


Рисунок 4 – Расчетная схема электромеханической системы непрерывного стана.

В соответствии с принятой схемой

электромеханической системы описание ее работы в общем виде выглядит следующим образом:

$$M - M_B = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_B – момент сопротивления движению; ω – скорость вращения вала двигателя; J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки.

Движение приведенных масс относительно равновесного состояния описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M - M_{12} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_B = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_3/2) \text{ при } |\varphi_1 - \varphi_2| < \Delta\varphi_3/2; \\ M_{12} = 0 \text{ при } |\varphi_2 - \varphi_1| \geq \Delta\varphi_3/2, \end{cases}$$

где M_{12} – момент упругого взаимодействия; c_{12} – приведённые жёсткости механических упругих связей; $\varphi_1, \varphi_2, \omega_1, \omega_2, J_1, J_2$ – углы поворота, угловые скорости, моменты инерции первой и второй масс; $\Delta\varphi_3$ – зазор в механических передачах.

Для учета влияния переходных процессов в электродвигателе на характер динамического нагружения в электромеханической системе клетки вводится описание двигателя постоянного тока независимого возбуждения в дифференциальных и алгебраических уравнениях в абсолютных единицах:

$$u = e + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt};$$

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot i;$$

$$E = C_\omega \cdot \Phi \cdot \omega,$$

где u – напряжение на якорной обмотке двигателя; e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; i – ток якоря; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; R – активное сопротивление якорной цепи; L – индуктивность якорной цепи; C_ω – коэффициент связи между скоростью и ЭДС; C_M – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом.

Математическая гидравлического устройства

модель нажимного

Математическая модель управления координатами гидравлического нажимного

устройства может быть описана тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями [20].

1. Уравнение расхода жидкости, поступающей в поршневую полость гидроцилиндра, для малых приращений координат:

$$Q = S_r \frac{dS_{ny}}{dt} + \frac{V}{E} \frac{dP_r}{dt} + r \cdot P_r,$$

где S_r – площадь поршня; S_{ny} – положение поршня гидроцилиндра; V – объем поршневой полости при начальном положении поршня; E – объемный модуль упругости рабочей жидкости; P_r – давление в поршневой полости; r – коэффициент утечек.

2. Уравнение, описывающее соотношение усилий в прокатной клети, для малых приращений координат:

$$P_r \cdot S_r = P_i + m \frac{d^2 S_{ny}}{dt^2} + b \frac{dS_{ny}}{dt},$$

где m – масса механических частей клети, перемещающихся вместе с гидроцилиндром, и масса жидкости в трубопроводе, приведенная к площади поршня; b – коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения ГНУ.

3. Уравнение сервоклапана для малых приращений координат:

$$T_y \frac{dQ}{dt} + Q = k_y \cdot u_y - k_{пр} \cdot P_i,$$

где T_y – постоянная времени сервоклапана; u_y – напряжение управления; k_y – расходный коэффициент сервоклапана; $k_{пр}$ – коэффициент жесткости перепадно-расходных характеристик сервоклапана.

Взаимосвязь между текущей толщиной полосы и величиной межвалкового зазора определяется уравнением Головина-Симса:

$$h_i = g_i + \frac{P_i}{K_{кл}},$$

где $K_{кл}$ – модуль жесткости клети.

Оценка адекватности математической модели

Динамическая модель процесса холодной прокатки реализована в системе MATLAB/Simulink. Ее адекватность исследуемому объекту оценивалась по

результатам сравнения параметров процесса прокатки, полученных при моделировании и путем осциллографирования на реальном 5-клетевом стане холодной прокатки 1700.

В качестве примера на рис. 5, а представлена диаграмма изменения силы прокатки по длине полосы, полученная экспериментальным способом при прокатке по режиму (табл. 1) для клети № 2. На рис. 5, б показана аналогичная диаграмма, полученная расчетным путем с использованием разработанной математической модели.

Таблица 1. Технологические параметры режима холодной прокатки полосы толщиной 0,9 мм и шириной 1075 мм на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь».

Клеть №	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	ε_i , %	N_{i-1} , кН	N_i , кН
1	7,7	3,0	2,22	26,06	111	329
2	10,58	2,22	1,62	27,1	329	271
3	14,24	1,62	1,2	25,73	271	226
4	18,24	1,2	0,94	21,98	226	186
5	19	0,94	0,9	3,95	186	44

Примечание. ε_i – частное относительное обжатие полосы в i -й клети.

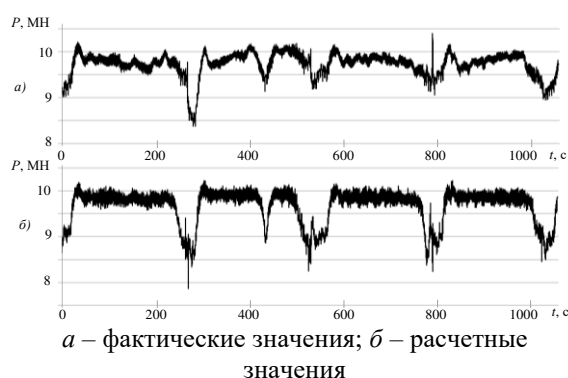


Рисунок 5 – Графики изменения силы прокатки.

Результаты статистического анализа выборки, характеризующей погрешности расчета силы прокатки, представлены в табл. 2, на рис. 6 представлены гистограммы распределения.

Таблица 2. Результаты статистического анализа погрешности расчета силы прокатки.

Статистический параметр	Значение
Максимальное значение ΔP_{max} , %	16,6
Минимальное значение ΔP_{min} , %	0
Математическое ожидание $\Delta \bar{P}$, %	1,86
Дисперсия D_P	4,15
Среднее квадратичное отклонение S_P , %	2,04

Примечание. В таблице представлены статистические параметры выборки значений погрешности без учета знака.

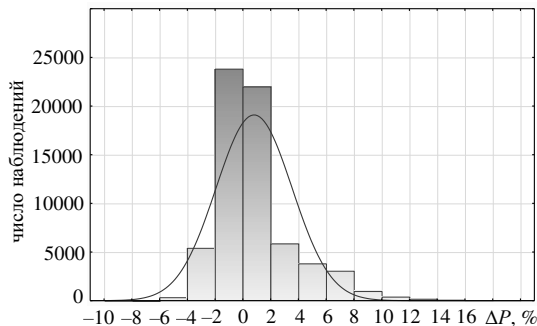


Рисунок 6 – Гистограммы распределения погрешности расчета силы прокатки.

Анализ данных статистической оценки точности математической модели показал, что максимальная погрешность расчета составила 16,6 %. В 93,1 % случаев расхождения расчетных и измеренных значений силы прокатки не превысили 6 %; в 2,3 % случаев погрешность превысила 10 %. Таким образом, можно сделать вывод о том, что модель обеспечивает высокую точность прогнозирования не только величины силы прокатки, но и характера его изменения.

Выводы

В работе представлена динамическая модель процесса холодной прокатки, объединяющая модели электромеханической системы прокатного стана, очага деформации и гидравлического нажимного устройства, учитывающая нестационарный характер и взаимосвязь процессов, протекающих в указанных объектах.

Полученные результаты планируется использовать для разработки способов снижения динамических нагрузок при холодной прокатке и уменьшения потерь электроэнергии, прогнозирования геометрических характеристик готовой продукции с учетом колебания межвалкового зазора и создания принципиально новых методик настройки и управления технологическим процессом и оборудованием прокатного стана.

Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 11.3943.2017/ПЧ).

Литература

1. Fleck N.A., Johncon K.L. Towards a new theory of cold rolling thin foil. // International

Journal of Mechanical Sciences, N 29, 1987. – p. 507–524.

2. Lee W.H. Mathematical model for cold rolling and temper rolling process of thin steel strip. // Journal of Mechanical Science and Technology, N 16(10), 2002. – p. 1296–1302.

3. Jortner D., Osterle J.F., Zorowski C.F. An analysis of cold strip rolling. // International Journal of Mechanical Sciences, N 2(3), 1960. – p. 179–194.

4. Roberts W.L. Cold rolling of steel. – New York: Marcell Dekker Inc., – 1978.

5. Liu Y., Lee W.H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method. // ISIJ International, N 45(8), 2005. – p. 1173–1178.

6. Freshwater I.J. Simplified theories of flat rolling – I. The calculation of roll pressure, roll force and roll torque. // International Journal of Mechanical Sciences, N 38(6), 1996. – p. 633–648.

7. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.

8. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

9. Alves P.G., Moreira L.P., de Castro J.A. Dynamic simulator for control of tandem cold metal rolling. // ABCM Symposium Series in Mechatronics, N 5, 2012. – p. 39–48.

10. Lee W.H., Lee S.R. Computer simulation of dynamic characteristics of tandem cold rolling process. // KSME International Journal, N 13(8), 1999. – p. 616–624.

11. Pittner J., Samaras N.S., Simaan M.A. A simple rolling mill model with linear quadratic optimal controller. // 37th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, N 1, 2002. – p. 142–149.

12. Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M. Development of a method for reducing the dynamic loads of the electric drive of the roll stand of the cold rolling mill. // Electrotechnical systems and complexes, N 28(3), 2015. – p. 14–19.

13. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

14. Кожевникова И.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 275 с.

15. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки. – Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. – 305 с.

16. Garber E.A., Shadrunkova I.A., Traino

AI, Yusupov VS. Analysis of a deformation zone and the refined calculation of the forces for cold rolling of strips thinner than 0.5 mm in a continuous mill. // Russian Metallurgy, N 4, 2002. – p. 300–315.

17. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrinova I.A., Traino A.I. Calculation of the cold-rolling power with allowance for the variable work of friction along a deformation zone. // Russian Metallurgy, N 4, 2003. – p. 340–346.

18. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых

прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.

19. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1967. – 259 с.

20. Браун А.Е., Дралюк Б.Н., Тикоцкий А.Е. и др. Управление координатами гидронажимного устройства прокатной клетки. Сборник научных трудов «Электропривод и автоматизация мощных машин». – Свердловск: НИИтяжмаш, 1988. – с. 40–51.

Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л. Математическое моделирование процесса холодной прокатки в условиях нестационарности и стохастичности технологических параметров. Разработана динамическая модель процесса холодной прокатки на непрерывном стане, объединяющая модели электромеханической системы, очага деформации и гидронажимного устройства. Представлены результаты статистической оценки точности модели по погрешности расчета силы прокатки. В результате установлено, что более чем в 93 % случаев погрешность расчета не превышает 6 %, максимальная погрешность составила 16,6 %. Математическая модель обеспечивает высокую точность прогнозирования величины и характера изменения силы прокатки с учетом нестационарности и стохастичности технологических параметров.

Ключевые слова: Холодная прокатка, нестационарный процесс, стохастичность параметров, очаг деформации, электромеханическая система.

Key words: Cold rolling, non-steady process, stochasticity of parameters, deformation zone, electromechanical system.

Kozhevnikov A.V., Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L. Mathematical modeling of cold rolling process in conditions of nonstationarity and stochasticity of technological parameters. A dynamic model of the cold rolling process at the continuous rolling mill that combines the model of the electromechanical system, the model of the deformation zone and the model of the hydraulic clamping device has been developed. The paper presents the results of the statistical evaluation of the accuracy of the model for uncertainty calculation of rolling force. The results showed that more than 93% of the cases the calculation error does not exceed 6 %, the maximum error of 16.6 %. The mathematical model ensures high accuracy of predicting the magnitude and nature of the change of rolling force with the consideration of non-stationarity and stochasticity of technological parameters. This research was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of the project part of state task of Cherepovets State University (№ 11.3943.2017/ПЧ).

Статья поступила в редакцию 12.2.2017
Рекомендована к публикации д-ром тех. наук В.Н. Павлышом