

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.771.066:004.9

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)Логунова О.С.¹, Кухта Ю.Б.¹, Кожушков Е.Ю.², Хакимуллин К.³¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»³ Hosokawa kolb GMBH (Германия)ПРОГРАММНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНОСА БОЧКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Целью исследования является развитие теории математического моделирования для описания процессов, протекающих при обработке металлов давлением и разработка программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований с целью определения особенностей износа бочки опорного вала прокатных станов; определение зависимости для описания формы образующей бочки вала с учетом его износа; уточнение математической модели Мельцера-Салганика с учетом износа бочки опорного вала. Авторами предложено векторное уравнение для описания образующей бочки вала с учетом его износа. При исследовании применялись методы системного анализа для изучения неравномерного износа бочки опорного вала, методы статистического анализа для выявления причинно-следственных взаимосвязей, методы построения детерминированных моделей для описания профиля полосы, объектно-ориентированного программирования для разработки основных модулей и интерфейса программного обеспечения. На основе алгоритмических решений разработаны программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента при определении характера износа бочки валков. Результаты вычислительного эксперимента показали расхождение с производственными измерениями не более 3% и позволили выработать рекомендации по изменению значений технологических параметров, которые компенсировали негативное влияние износа опорных валков при производстве горячекатаного проката.

Ключевые слова: математическое моделирование, программное обеспечение, алгоритмы определения профиля, программная реализация, форма образующей опорного прокатного вала, математическая модель износа, моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире математические модели являются одним из мощнейших инструментов изучения процессов и явлений. Не являются исключением и процессы металлургического производства. Условия протекания металлургических процессов не позволяют выполнить прямые измерения изучаемых параметров, поэтому активно развиваются математические модели [1–3] и средства их реализации в виде программных продуктов для проведения вычислительных экспериментов [4–7]. Наличие развитого математического аппарата позволяет использовать результаты моделирования в системах интеллектуальной поддержки принятия решения при управлении процессами [8–10].

В работе представлены математическая модель и результаты моделирования износа бочки опорных прокатных валков, которые используются в процессе обработки металлов давлением. Востребованность продукции прокатного производства высока и важна для экономики Российской Федерации. В качестве основных примеров востребованности можно указать «Южный поток» – проект транснационального газопровода, который разрабатывается в целях диверсификации маршрутов поставок природного газа европейским потребителям и предполагает доставку голубого топлива через акваторию Черного моря в страны Южной и Центральной Европы; «Скверный поток» – экспортный газопровод из России в Европу через Балтийское море.

В настоящее время известно множество работ российских и зарубежных авторов, которые рассматривают:

– модели нагрузок и деформаций валкового узла, с учетом усилия прокатки, ширины полосы, диаметра

вала авторов А.И. Целикова, П.И. Грудева, С.С. Чепуркина и др. [11–13];

– матрично-векторную математическую модель нагрузок и деформаций валковых систем «кварто» Мельцера-Салганика [14–16], в которой все геометрические и силовые величины представлены дискретно;

– стохастические модели прогнозирования износа бочки прокатных валков А. Будаквы, Э. Н. Шебаниц, Л.И. Боровиком и др. [17–20].

Представляемая модель включает:

– математическую модель износа поверхностей бочек опорных валков чистовой группы клеток широкополосного стана горячей прокатки, отличающуюся от ранее известных наличием параметров, описывающих динамику изменения формы активной образующей опорных валков с учетом симметричной схемы нагружения валковой системы и возможностью получения информации о текущей форме активной образующей;

– математическую модель нагрузок деформаций валковой системы, которая дополнена описанием износа поверхности бочек опорных валков и определением формы поперечного профиля полосы и ее плоскостности с учетом износа на основе косвенных измерений.

Для проведения вычислительного эксперимента по изучению износа бочки опорного вала разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие использовать сведения о предшествующих графиках произведенного металлопроката для моделирования формы активных образующих опорных валков, прогнозировать образование возможных дефектов геометрии полосы до начала процесса производства.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ БОЧКИ ОПОРНОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА

Для построения математической модели износа поверхности бочки опорного прокатного вала введем определение.

Df 1. Профиль прокатного вала – это образующая цилиндрической поверхности бочки рабочего вала. [20]

Идеальной с точки зрения точности технологического процесса является прямоугольная форма поперечного сечения (рис. 1, а). Однако практический опыт показывает, что необходима небольшая выпуклость, составляющая 1–2% номинальной толщины полосы (рис. 1, б). Идеальный поперечный профиль горячекатаного подката является двояковыпуклым и симметричным относительно продольной оси. На практике имеют место всевозможные отклонения формы профиля от идеальной. Например, «клиновидность» (разность толщин правой и левой кромок, рис. 1, в) или «вогнутость» (толщина кромок листа больше середины, рис. 1, г).

Основной показатель для оценки плоскостности полосы определяется как:

$$A = \max_{i=1,n} \{A_i\} \text{ при } A_i = |y_{1i} - y_{2i}|, \quad (1)$$

где A – показатель плоскостности полосы, мм; A_i – показатель плоскостности в i -ой точке поверхности полосы, мм; i – номер точки в разбиении поверхности полосы на равные интервалы; n – количество точек в разбиении поверхности полосы на равные интервалы; y_1, y_2 – координаты i -ых точек поверхности полосы и бочки вала (рис. 2).

Df 2. Профиль полосы – средняя величина зазора между поверхностью полосы и бочки вала, характеризующая расстояние между поверхностью полосы и поверхностью бочки вала.

Одна из методик описания профиля полосы использует формулу.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (2)$$

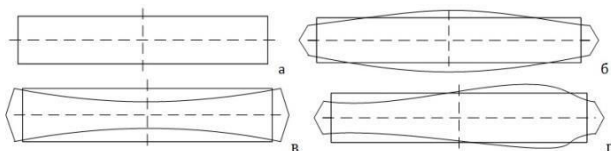


Рис. 1. Профили прокатного вала:
а – идеальный поперечный; б – выпуклый;
в – клиновидный; г – вогнутый

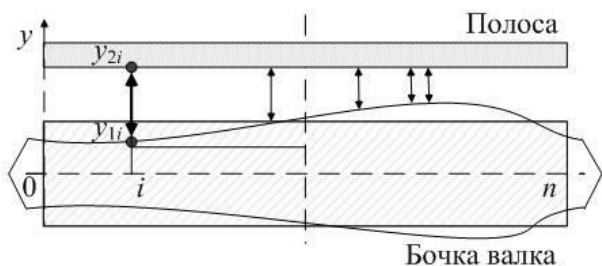


Рис. 2. Схема расчета показателя плоскостности полосы

В производственных условиях оценку профиля полосы производят по замерам ее толщины в нескольких точках, относящихся к середине полосы и участкам кромок. Допускаются незначительные отклонения поперечного профиля полосы, которые регламентируются нормативными документами предприятия, а также требованиями государственных стандартов [21].

Согласно проведенным исследованиям методика прогнозирования истирания поверхности бочки опорного вала базируется на следующих допущениях:

- 1) допускается использование симметричной схемы при прогнозировании износа опорного вала относительно вертикальной оси;
- 2) при построении уравнения для описания профиля полосы достаточно учесть неравномерный характер распределения износа по длине бочки опорного вала.

По результатам проведенного эмпирического исследования предложено уравнение для описания образующей бочки вала с учетом его износа:

$$\vec{Z}_w = Q \cdot \left[\vec{K}_w - \vec{K}_w \cdot \left(1 - \frac{12 \cdot \vec{x}^2}{b^2 \cdot K_{ld}^2} \right) \right]; \quad (3)$$

$$\vec{x} = \frac{1}{n} \left(0, 1, 2, \dots, \frac{b}{l}, \dots, 2b \right), i = \overline{0, n},$$

где \vec{Z}_w – функция для описания формы поверхности вала; x_i – абсциссы точки узлов при разбиении поверхности вала на равные отрезки (см. рис. 2); Q – длина прокатываемой полосы, м; b – половина ширины прокатываемой полосы, м; l – половина длины бочки опорного вала, м; K_{ld} – половина длины межвалкового контакта (протяженность области соприкосновения рабочего и опорного вала), м; \vec{K}_w – вектор коэффициентов интенсивности износа бочки вала, м/км; \vec{x} – вектор столбец, содержащий значения абсцисс точек разбиения.

В формуле (3) полагается, что коэффициент интенсивности износа изменяет значение по длине образующей бочки вала. Наибольшее значение коэффициента интенсивности износа достигается в центре при $x=b/l$, а наименьшее – на концах отрезка образующей. На остальных участках образующей принимаются усредненные значения коэффициента интенсивности износа бочки вала.

Величина коэффициента интенсивности износа бочки вала определяется в зависимости от количества произведенного проката за кампанию валков. Числовое значение определяется программно по результатам обработки экспериментальных данных о сортаменте проката каждой кампании валков.

Отличительными особенностями математической модели для описания образующей бочки вала с учетом износа (3) от ранее известных являются:

- использование квадратичной параболы для описания образующей бочки вала, что с высокой точностью подтверждено экспериментальными исследованиями;
- определение величины износа в каждой равноудаленной точки x_i , расположенной вдоль поверхности

бочки вала, по аналитической зависимости;

– введение эмпирического коэффициента интенсивности износа бочки вала.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗОК И ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛКОВОЙ СИСТЕМЫ КВАРТО

Известна и активно применяется для описания нагрузок, деформаций и анализа профиля полос модель Мельцера-Салганика [14, 15]. Модель предполагает, что в качестве исходных данных используется профиль вала, который остается постоянным на протяжении всего периода работы в течение 10–14 дней. Такое допущение снижает точность прогнозирования профиля готовой полосы. Модель Мельцера-Салганика [22] дополнена динамическими параметрами износа бочки вала.

Искомый вектор для профиля выходящей из клетки полосы определяется по соотношению:

$$\delta \bar{h} = \left[1 - \frac{K_e}{K_c} \right] \cdot E \cdot (\bar{y}_{w1} + \bar{y}_{w2} - \bar{z}_{w1} - \bar{z}_{w2}) + \frac{K_e}{K_c} \cdot E \cdot \delta \bar{H}, \quad (4)$$

где исходные данные определяются по следующим выражениям:

$$\bar{y}_{w1} = \bar{y}'_{w1} + M_{A1} \cdot (\bar{z}_{w1} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w1} + \bar{y}_{s1}) + M_B \cdot (\bar{y}_{w1} + \bar{y}_{w2} - \bar{z}_{w1} - \bar{z}_{w2} - \delta \bar{H}), \quad (5)$$

$$\bar{y}_{w2} = \bar{y}'_{w2} + M_{A2} \cdot (\bar{z}_{w2} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w2} + \bar{y}_{s2}) + M_B \cdot (\bar{y}_{w1} + \bar{y}_{w2} - \bar{z}_{w1} - \bar{z}_{w2} - \delta \bar{H}), \quad (6)$$

$$\bar{y}_{s1} = \bar{y}'_{s1} + M_1 \cdot (\bar{z}_{w1} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w1} + \bar{y}_{s1}), \quad (7)$$

$$\bar{y}_{s2} = \bar{y}'_{s2} + M_2 \cdot (\bar{z}_{w2} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w2} + \bar{y}_{s2}), \quad (8)$$

$$\bar{p} = P \cdot \bar{l} / l - B \cdot (\bar{y}_{w1} + \bar{y}_{w2} - \bar{z}_{w1} - \bar{z}_{w2} - \delta \bar{H}), \quad (9)$$

$$\bar{q}_1 = \frac{(P+F)}{l} \bar{l} + A_1 \cdot (\bar{z}_{w1} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w1} + \bar{y}_{s1}), \quad (10)$$

$$\bar{q}_2 = \frac{(P+F)}{l} \bar{l} + A_2 \cdot (\bar{z}_{w2} + \bar{Z}_w + \bar{y}_{w2} + \bar{y}_{s2}), \quad (11)$$

где P – половина усилия прокатки, Н; F – регулирующая сила (усилие противоизгиба), Н; R – реакция нажимного винта (опорная реакция), Н; K_c – коэффициент упругой податливости рабочих валков, кН/мм², K_e – эффективный коэффициент податливости, кН/мм²; \bar{y}'_{s1} , \bar{y}'_{s2} – векторы прогибов опорных валков (верхнего и нижнего соответственно); \bar{y}'_{w1} , \bar{y}'_{w2} – векторы прогибов рабочих валков (верхнего и нижнего соответственно); \bar{z}_{w1} , \bar{z}_{w2} – векторы, зада-

ющие форму образующей рабочего вала; \bar{q}_1 , \bar{q}_2 – векторы межвалкового давления; \bar{p} – вектор погонного давления; $\delta \bar{H}$ – вектор профиля входящей в клетку полосы; $\delta \bar{h}$ – вектор профиля выходящей из клетки полосы; E – единичная матрица; \bar{y}'_{w1} , \bar{y}'_{w2} – составляющие прогибов верхнего и нижнего рабочих валков; \bar{y}'_{s1} , \bar{y}'_{s2} – составляющие прогибов верхнего и нижнего опорных валков; A_1 , A_2 , B – матричные множители, которые представлены в виде единичных матриц разных порядков с размерностью, определяемой полушириной полосы и полудлиной межвалкового контакта и, например, матрица податливости вала изгибающему моменту B является трехдиагональной и имеет вид:

$$B = \frac{l}{n \cdot 6 \cdot E_s \cdot J_s} + \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где n – число разбиений длины бочки вала; l – половина длины бочки вала; E_s – модуль Юнга I рода; J_s – осевой момент инерции; M_{A1} , M_{A2} , M_B , M_1 , M_2 – матричные множители, которые входят в выражения для определения прогибов рабочих и опорных валков соответственно.

Уравнения (5)–(8) описывают деформации валков во взаимосвязи с основными геометрическими характеристиками: текущие профилировки валков; поперечная разнотолщинность прокатываемой полосы на входе и выходе из клетки. Уравнение прогиба каждого вала показывает зависимость в явном виде от прогибов соседних валков, с которыми он находится в непосредственном контакте или взаимодействует через полосу. Уравнения системы (9)–(11) характеризуют распределения сплошных нагрузок, действующих на валки. Эти распределения зависят от деформаций и текущих профилей валков, а также от профиля прокатываемой полосы.

Таким образом, получена уточненная математическая модель (3)–(11) для прямой задачи, которая используется для получения вектора, характеризующего профиль поперечного сечения полосы на выходе из клетки (4) с учетом динамической деформацией валков и распределенной нагрузки (3).

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для реализации математической модели и проведения вычислительного эксперимента разработаны программные продукты [23–25], в основе которых лежат новые алгоритмические решения. На рис. 3 представлена обобщенная схема работы программных модулей, которые включают прогнозирование профиля опорных валков согласно математической модели (3)–(11).

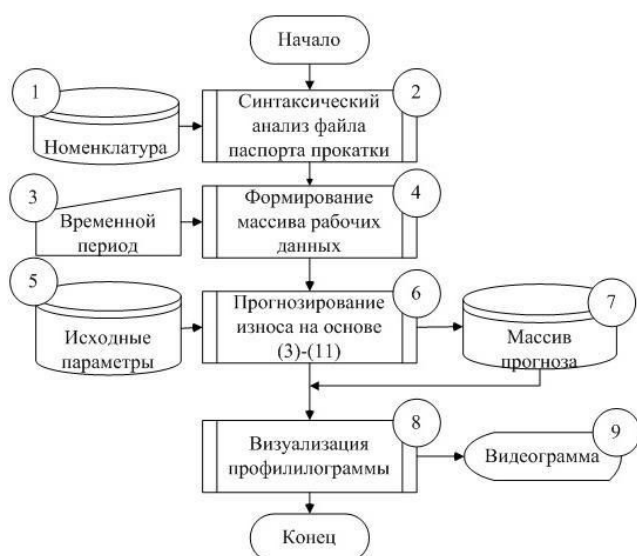


Рис. 3. Обобщенная схема работы программных моделей для прогнозирования профиля валков

На рис. 3 введены блоки:

- блок 1: носитель информации в корпоративной сети ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», хранящий сортамент выпущенной продукции;
- блок 2: программный модуль для синтаксического разбора паспорта прокатки, загружаемого из корпоративного Хранилища в формате HTML;
- блок 3: интерактивное определение периода времени, за которое необходимо обработать данные о готовой продукции;
- блок 4: структурирование и обработка информации о параметрах и количестве произведенного проката;
- блок 5: инициализация основных переменных и их значений для последующих расчетов;
- блок 6: реализация основных функций, основанных на методике определения текущей формы образующих опорных валков клетки «кварто»;
- блок 7: процедура сохранения расчетных значений в базу данных для дальнейшего использования;
- блок 8: построение диаграмм, отображающих текущий профиль валков (профилилограммы);
- блок 9: определение и визуализация текущего профиля и плоскостности полосы с учетом текущего износа опорных валков.

Алгоритм анализа данных следующий:

- 1) рассчитать общий километраж прокатанных полос за каждую кампанию;
- 2) вычислить среднюю величину износа по (2), обобщив замеренные данные по всем валкам;
- 3) для прогнозирования износа опорных валков определить значение коэффициента K_w для каждой зоны валка с характерной степенью интенсивности износа, сформировав вектор значений;
- 4) оценить уровень износа опорного прокатного валка в соответствии с моделью (3)–(9);
- 5) сформировать рекомендации по компенсации негативного влияния искажения формы активной образующей на качество трубного проката с использованием программного продукта [24] (рис. 4).

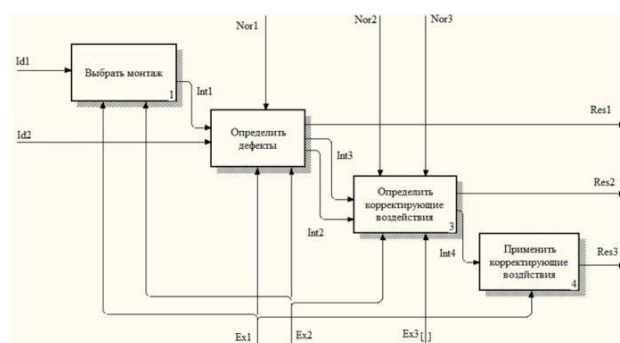


Рис. 4. Схема декомпозиции работы модуля «Профиль проката»

Номенклатура обозначений на рис. 4 приведена в таблице.

Номенклатура обозначений

№	Обозначение	Полное наименование
1	Id1	Информация о плане выпуска продукции (монтаж)
2	Id2	Информация о количестве партий в монтаже
3	Ex1	Оператор чистой группы клеток
4	Ex2	Технолог научно-технического центра
5	Ex3	Программное обеспечение
6	Res1	Информация о количестве дефектов
7	Res2	Перечень изменяемых технологических параметров
8	Res3	Перечень партий, которые готовы к обработке
9	Nor1	Математическая модель для описания нагрузок, деформаций и профиля полосы
10	Nor2	ГОСТ 19903. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент
11	Nor3	Технологическая инструкция 101-Я-378-2004 «Производство проката из стали марок 17ГС 17Г1С, 17Г1С-У на станах 2000,2500 горячей прокатки»
12	Int1	Перечень партий монтажа
13	Int2	Параметры дефектов
14	Int3	Перечень партий с дефектами
15	Int4	Новые значения технологических параметров

Результатом работы алгоритмов является вектор, характеризующий профиль рабочих валков, который позволяет компенсировать текущий износ опорных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗНОСА БОЧКИ ПРОКАТНОГО ВАЛКА

Для выработки рекомендаций по изменению значений технологических параметров производства горячекатаного листового металлопроката проведен многочисленный вычислительный эксперимент. На рис. 5–7 представлены виды рабочих окон программного продукта при выполнении моделирования на основе (3)–(11).

ОО	Время проката	Партия	Плоская	Марка	Контр.	ГОСТ	Р.г.м.	Посад			Прокат			Цех	Налик	Рас. коэф.			
								Профиль	Раст.	Вит.	Профиль	Длина	Вит.						
11.04.2.4	46106	223585	Ойск			ГОСТ 9045-93		250x1260x100	12.63	2	25.26	4.00	x1300	0.6	2	24.62	ЛПЦ-4	8	1.0239
11.04.2.4	46107	236030	Ойск	5		ГОСТ 16523-97		250x1250x300	12.75	5	63.79	3.00	x1230	2.11	5	62.23	ЛПЦ-4	8	1.0249
11.04.2.4	46108	236030	Ойск	5		ГОСТ 16523-97		250x1250x300	12.75	10	127.58	3.00	x1230	4.23	10	124.47	ЛПЦ-4	8	1.0249
11.04.2.4	46109	125236	М			СТО ММК 202-2005		250x1260x100	12.63	2	25.26	5.00	x1300	0.47	2	24.19	ЛПЦ-4	8	1.0439
11.04.2.4	46110	232639	Ойск			ГОСТ 9045-93		250x1250x300	12.72	5	63.6	7.00	x1270	0.89	5	61.99	ЛПЦ-8	8	1.0239

Рис. 5. Вид рабочего окна с исходными данными после синтаксического анализа паспорта партии

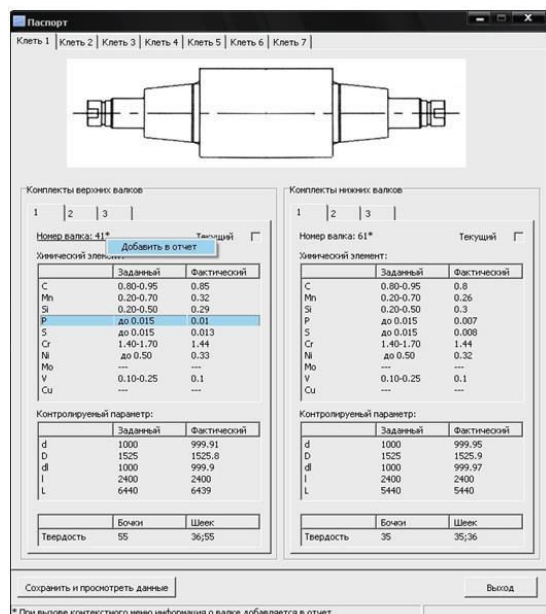


Рис. 6. Вид рабочего окна программного модуля для отображения и коррекции данных по паспорту вала прокатного стана

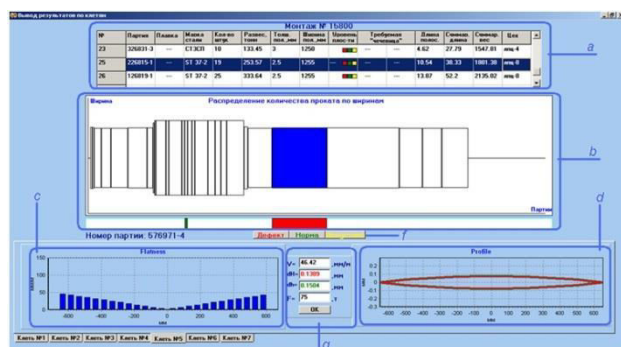


Рис. 7. Вид рабочего окна программного модуля для отображения результатов моделирования: а – перечень плановых партий полос; б – графическое отображение ширины полос в кампании; с – диаграмма плоскостности полосы; d – диаграмма поперечного профиля полосы; g – значения рекомендуемых технологических параметров; f – сигнальная информация

На рис. 8 представлены результаты математического моделирования формы образующей верхнего опорного вала в девятой клетке широкополосного стана горячей прокатки 2500 ПАО «ММК».

Расхождение результатов математического моделирования и экспериментального исследования профилей валков составили в среднем не более 10%. Практическое использование методики прогнозирования изменения профиля опорных валков показало, что точность расчетов является достаточной для определения корректирующих воздействий, позволяющих устранить негативное влияние изменения профиля опорных валков при производстве листового проката и повысить качество готовой продукции.

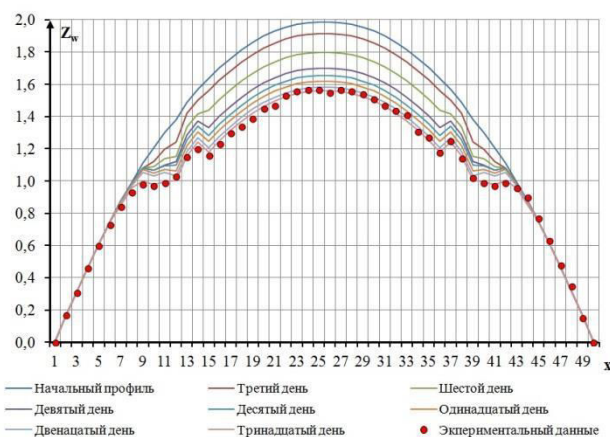


Рис. 8. Результаты математического моделирования формы образующей верхнего опорного вала в девятой клетке (профилограмма)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты анализа существующих разработок показали наличие множества математических моделей для прогнозирования профиля рабочих валков прокатных станов. Однако ни одна из существующих моделей не рассматривала значение коэффициента износа валков как вектор значений по длине объекта.

2. Для модели Мельцера-Салганика [22] введено дополнение в виде динамических параметров износа бочки вала по его длине.

3. На основе алгоритмических решений разработаны программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента износа бочки валков. Результаты вычислительного эксперимента показали расхождение с производственными измерениями не более 3% и позволили выработать рекомендации по изменению значений технологических параметров в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Christian Brecher, Denis Özdemir. Mathematical modeling of rolling production technology. Springer, 2016, p. 1104.
- R. Fabik, J. Kliber, I. Mamuzić, T. Kubina, S.A. Aksenov. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (fem). METABK 51. 2012, no. 3, pp. 341–344.
- Abeyrathna B, Rolfe B, Hodgson P, Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015, pp. 1–13.
- Бродский Ю.И., Мягков А.Н. Декларативное и императивное программирование в имитационном моделировании сложных многокомпонентных систем // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Т. 2. № 2. С. 33.
- Lindgren M. An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a rollformed U-channel developed by FE-analyses. Steel Research International, 2007, no. 78 (1), pp. 82–87.
- Bin Su, Qingxian Ma and, Zhiqiang Han. Modeling of Austenite Decomposition during Continuous Cooling Process in Heat Treatment of Hypoeutectoid Steel with Cellular Automaton Method. ISIJ International, 2014, no. 54 (2), pp. 422–429.
- Ed. Erika Ábrahám, Klaus Havelund. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems - 20th International Conference, TACAS 2014, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS, 2014, no. 3, pp. 75–83.
- Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet pro-

- duction control processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, no. 74(9–12), pp. 1407–1418.
9. Safonov D.S., Logunova O.S., Chistiakov D.V. Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 2016, no. 9(1), pp. 114–122.
10. Tutarova V.D., Logunova O.S. Surface temperature analysis of continuously cast ingot outside air/water cooling zone. Steel in Translation, 1998, no 28 (8), pp. 18–20.
11. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. 432 с.
12. Грудев П.И.. Обработка металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1953. 223 с.
13. Чепуркин С.С. Производство и обработка стали: науч. тр. / ЖдМИ. М.: Металлургиздат, 1960. № 5. С. 346–371.
14. Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill. Metal Forming, 2002, no. 2, pp. 103–107.
15. Виер И.В., Салганик В.М., Полецков П.П. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто с учетом асимметричных случаев процесса прокатки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 78–86.
16. Winkler W. DR-Ing. Dissertation der TH Aachen. 1941. 230 pp.
17. Профилирование валков листовых станов / Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др. К.: Техника, 1986. 190 с.
18. Износ опорных валков и изменение шлифовочного профиля рабочих валков дрессировочного стана / Шебаниц Э.Н., Савранский К.Н. и др. // Металлург. 1971. №11. С. 42–43.
19. Боровик Л.И., Колпаков С.С. Расчет профилировки валков тонколистовых станов с учетом износа опорных валков // Сталь. 1987. №12. С. 44–47.
20. Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 412 с.
21. ГОСТ 19903-74. Сталь листовая горячекатаная. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2003. 31 с.
22. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / Салганик В.М., Полецков П.П., Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №1. С. 59–62.
23. Свидетельство № 2015663617. Программа для определения деформации прокатных валков / Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2015660450 ; заявл. 02.11.2015 ; зарегистрир. 20.02.2016.
24. Свидетельство № 2015663617. Программа определения режимов обжатий в клетях на широкополосном стане горячей прокатки / Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2015660448 ; заявл. 02.11.2015 ; зарегистрир. 20.02.2016.
25. Свидетельство № 2014618081. Программа определения режимов обжатий в клетях на широкополосном стане горячей прокатки / Полецков П.П., Кухта Ю.Б. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2014615850; заявл. 17.06.2014; зарегистрир. 20.09.2014.

Поступила в редакцию 01 июня 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SOFTWARE AND MATH MODELING OF ROLL BARREL WEAR

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru

Iuliia B. Kukhta

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: perfectumyuka@mail.ru

Evgenii Y. Kozhushkov

Lead Engineer, Scientific and technical center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozhushkov.ey@mmk.ru

Konstantin Khakimullin

Project Engineer, Hosokawa kolb GMBH, Bonn, Germany. E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de

The aim of the research is to develop the theory of mathematical modeling for describing the processes occurring during the processing of metals by pressure and the development of software for conducting experimental studies to determine the wear characteristics of the roll barrel of rolling mills; determination of the dependence for describing the shape of the barrel forming roll, taking into account its wear; refinement of the mathematical model of Meltzer-Salganika taking into account the wear of the roll of the support roll. The authors proposed a vector equation for describing the barrel forming roller with regard to its wear. The research used methods of system analysis to study the uneven wear of the roll barrel, methods of statistical analysis

to identify cause-effect relationships, methods for constructing deterministic models for describing the profile of the strip, object-oriented programming for the development of basic modules and the software interface. On the basis of algorithmic solutions, software products have been developed to perform a computational experiment to determine the nature of the roll barrel wear. The results of the computational experiment showed a discrepancy with production measurements of no more than 3% and allowed the research group to work out recommendations on changing the values of technological parameters that compensated for the negative effect of wear of the back-up rolls in the production of hot-rolled steel.

Keywords: Mathematical modeling, software, profile definition algorithms, software implementation, the form of the forming roll, the mathematical model of wear, the modeling of deformations and loads of the four-high mill stand.

REFERENCES

- Christian Brecher, Denis Özdemir. Mathematical modeling of rolling production technology. Springer, 2016, p. 1104.
- Fabík, J. Kliber, I. Mamuzić, T. Kubina, S. A. Aksenov. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (fem). METABK 51, 2012, no. 3, pp. 341–344.
- Abeyrathna B, Rolfe B, Hodgson P, Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, pp. 1–13.
- Brodsky Yu.I., Myagkov A.N. Declarative and imperative programming in the simulation of complex multicomponent systems. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 2 (2), pp. 33. (In Russian)
- Lindgren M. An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a rollformed U-channel developed by FE-analyses. *Steel Research International*, 2007, no. 78 (1), pp. 82–87.
- Bin Su, Qingxian Ma and, Zhiqiang Han. Modeling of Austenite Decomposition during Continuous Cooling Process in Heat Treatment of Hypoeutectoid Steel with Cellular Automaton Method. *ISIJ International*, 2014, no. 54 (2), pp. 422–429.
- Ed. Erika Ábrahám, Klaus Havelund. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems - 20th International Conference, TACAS 2014, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS, 2014, no. 3, pp. 75–83.
- Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, no. 74 (9–12), pp. 1407–1418.
- Safonov D.S., Logunova O.S., Chistiakov D.V. Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2016, no. 9(1), pp. 114–122.
- Tutarova V.D., Logunova O.S. Surface temperature analysis of continuously cast ingot outside air/water cooling zone. *Steel in Translation*, 1998, no 28(8), pp. 18–20.
- Tselikov AI, Smirnov V.V. *Prokatnye stany* [Rolling mills]. Moscow. Metallurgizdat, 1958. 432 p. (In Russian)
- Grudev P.I. *Obrabotka metallov davleniem* [Treatment of metals by pressure]. Moscow. Metallurgizdat, 1953. 223 p. (In Russian)
- Chepurkin S.S. *Proizvodstvo i obrabotka stali* [Production and processing of steel]. Scientific works of ZhdMI, 1960, no. 5. pp. 346–371 (In Russian).
- Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill. *Metal Forming*, 2002, no. 2, pp. 103–107.
- Vier I.V., Salganik V.M., Poletskov P.P. *Matematicheskoe modelirovanie deformatsiy i nagruzok valkovoy sistemy kvarto s uchetom asimetrichnykh sluchaev protsessy prokatki* [Mathematical modeling of deformations and loads of the quarto roll system taking into account asymmetric cases of the rolling process. Modeling and development of metal forming processes]: inter-regional collection of scientific papers, Magnitogorsk, 2002, pp. 78–86. (In Russian)
- Winkler W. DR-Ing. Dissertation der TH Aachen, 1941, 230 pp.
- Budakva A.A., Kononov Yu.V., Tklich K.N. *Profilirovaniye valkov listovykh stanov* [Profiling of sheet mill rolls]. Kiev. Technique, 1986, 190 pp.
- Shebanyts E.N., Savransky K.N. and etc. Wear of back-up rolls and change of the grinding profile of the work rolls of a skin pass mill. *Metallurgist*, 1971, no. 11. pp. 42–43. (In Russian)
- Borovik L.I., Kolpakov S.S. Calculation of the profiling of thin-sheet mill rolls taking into account the wear of the supporting rolls. *Steel*, 1987, no. 12. pp. 44–47. (In Russian)
- Lyakishev N.P. *Encyclopedic Dictionary of Metallurgy*. Moscow. Internet Engineering, 200, 412 pp.
- State Standard R 19903-74. Hot-rolled sheet steel. Assortment. Moscow. IPK Publishing house of standards, 2009. 11 pp.
- Salganik V.M., Poletskov P.P., Kukhta Yu.B., Egorova L.G. Quality management of hot rolled products in profile and flatness based on the use of an automated system. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 1, pp. 59–62. (In Russian)
- Certificate no. 2015663617. Program for determining deformation of rolling rolls. Kukhta Yu.B., Egorova L.G. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, no. 2015660450; Claimed. 02.11.2015; date of registration. 20.02.2016.
- Certificate no. 2015663617. Program for determining compression regimes in stands of a wide strip hot rolling mill. Kukhta Yu.B., Egorova L.G. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, no. 2015660448; Claimed. 02.11.2015; date of registration. 20.02.2016.
- Certificate no. 2014618081. Program for determining the compression regimes in stands of a wide strip hot rolling mill. Poletskov PP, Kukhta Yu.B. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, No. 2014615850; Claimed. 06/17/2014; date of registration. 20.09.2014.

Программное и математическое обеспечение для моделирования износа бочки прокатных валков / Логунова О.С., Кухта Ю.Б., Кожушков Е.Ю., Хакимуллин К. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 59–65. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)

Logunova O.S., Kukhta Yu.B., Kozhushkov E.Y., Khakimullin K. Software And Math Modeling Of Roll Barrel Wear. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 59–65. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)