



УДК 67.02

Е.А. Максимов¹, Е.П. Устиновский²

¹ЗАО «Интрай»

²ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: maksimov50@mail.ru

Дата поступления 04.04.2018

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРАВКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ С УЧЕТОМ ПРОГИБА И ИЗНОСА БОЧЕК РОЛИКОВ

Аннотация

Разработана методика расчета параметров правки, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов правильной машины (РПМ).

Математическое моделирование показало, что при изгибе и износе бочек роликов по их длине изгибающие моменты снижаются от середины к краям листа. Изменение изгибающих моментов необходимо учитывать при расчетах технологических параметров правки: усилия правки и крутящих моментов.

Проведены исследования износа по длине бочки роликов на семироликовой РПМ. Представлено уравнение регрессии износа по длине бочки ролика.

Ключевые слова: правка толстых листов, роликовая правильная машина, прогиб и износ бочек роликов, методика расчета параметров правки.

Введение

Одним из путей совершенствования технологии производства металлических строительных конструкций, способствующих повышению их надежности, является разработка оптимальных технологических параметров правки листового проката, обеспечивающих нормативную величину его отклонения от плоскостности. Так, в соответствии с ГОСТ 23119 -2007 допуски на прогиб листовой стали толщиной от 2 до 10 мм после правки на РПМ должны составлять не более 3-10 мм.

В трудах отечественных и зарубежных ученых Е.Н. Мошнина, А.З. Слонима, Л.А. Сони́на, А.Х. Винокурского, И.В. Недорезова [1-7], разработана методика расчета параметров правки листового проката, в соответствии с которой толщина листа и диаметр ролика - роликовой правильной машины (РПМ) принимаются постоянными по длине бочки.

На практике бочки роликов подвергаются упругому прогибу под действием усилия правки, а также радиальному износу

под действием нагрузки со стороны обрабатываемого листового проката, что необходимо учитывать при настройке РПМ [8-9].

Целью работы является уточнение методики расчета параметров правки листового проката на РПМ с учетом прогиба и износа бочек роликов по их длине.

Основная часть

Рассмотрим более подробно методику расчета параметров правки с учетом прогиба и износа бочки ролика РПМ.

Задаемся законом изменения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа от второго ролика к последнему при последовательном движении листа от первого к седьмому ролику

$$k_{si} = k_2 \left(1 - \frac{i-2}{n-3}\right), \quad (1)$$

где k_2 - максимальная величина коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа для второго ролика,

i - порядковый номер ролика в РПМ,

n - число роликов в РПМ.

Из предположения упруго - пластического изгибающего момента для всех роликов РПМ определяем величину упруго-пластического изгибающего момента при изгибе листа для i - того ролика:

$$M_{S_{yi}} = M_y (1 + k_{si}), \quad (2)$$

где $M_y = \sigma_s \frac{B h^2}{6}$ - упругий момент внутренних сил,

σ_s - предел текучести материала листа,

B, h - ширина и толщина листа.

Усилие правки определим по формуле [2]:

$$P_i = \frac{2}{t} M_{S_{yi}}, \quad (3)$$

где t - величина шага роликов в РПМ.

В общем случае рабочий ролик представляет собой балку постоянного сечения, находящуюся под нагрузкой, приложенной по середине бочки и реакций, приложенных в опорах ролика. В результате действия нагрузки ролик подвергается упругому прогибу, максимальному в середине бочки. В этом случае профиль бочки ролика будет отличаться от цилиндрического, что приводит к изменению параметров правки по ширине листа.

Максимальную величину упругого прогиба по середине бочки ролика от действия усилия правки определим по формуле:

$$f = \frac{P B^3}{384 E J_c^4} \left[8 \left(\frac{a}{B} \right)^3 - \left(\frac{a}{B} \right) + 1 \right] \quad (4)$$

где P - усилие правки,

a - расстояние между точками приложения реакций в подшипниках,

B - ширина листа,

E - модуль упругости материала роликов,

J_c - момент инерции сечения бочки ролика.

На рисунке 1 приведена схема семироликовой РМП СКМЗ для правки листа толщиной 20 мм – 50 мм из стали Ст3, 09Г2С, 09Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, 16Г2АФ.

Техническая характеристика семироликовой правильной машины РПМ представлена в таблице 1.

Расчет коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа, усилия правки и прогиба по середине бочки ролика для семироликовой РПМ при

правке листа толщиной $h = 20$ мм, шириной $B = 2500$ мм из стали 10ХСНД представлен в таблице 2.

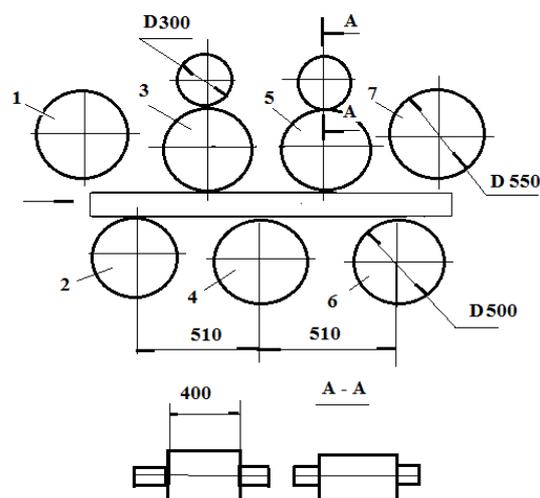


Рисунок 1. Схема семироликовой РПМ:
1-7 – номер ролика

Таблица 1
Техническая характеристика
семироликовой правильной машины РПМ

Максимальная ширина листа, мм	3450
Максимальная толщина листа, мм	45
Расчетный предел текучести проката, МПа	330
Скорость правки, м/мин	9,6
Количество рабочий роликов, шт	5
Количество направляющих роликов, шт	2
Диаметр правильных роликов, мм	500
Диаметр направляющих роликов, мм	550
Длина роликов, мм	3600
Шаг между осями роликов, мм	510
Ход верхних правильных роликов, мм	30-130

Таблица 2

Результаты расчета прогиба по середине бочки ролика для семироликовой РПМ при правке листа из стали 10ХСНД ($B = 2500$ мм, $h = 20$ мм)

№ ролика	k_{sy}	P	f
-	-	кН	мм
1*	-	-	-
2	0,97	1202,7	3,07
3	0,925	601,2	2,39
4	0,859	558,4	2,85
5	0,773	502,3	2,57
6	0,667	217,9	1,76
7*	-	-	-

*на 1-м и 7-мом роликах деформации листа не происходит.

Анализ данных, приведенных в таблице 2 для семироликовой РПМ показал, что при правке листа $h = 20$ мм, $B = 2500$ мм из стали 10ХСНД усилие правки изменяется от 217,9 кН до 1202,7 кН, что приводит к значительному прогибу бочек роликов (до 3,07 мм).

Эффективность правки и качество листового проката зависит также от состояния поверхности рабочих роликов и степени их износа. При правке листов на РПМ в результате износа рабочих роликов по длине бочки происходит изменение диаметров роликов и, как следствие, изменение толщины листа, которая входит в уравнения для расчета изгибающих моментов. Исследование износа по длине бочки роликов проводилось на семироликовой РПМ. В качестве объекта был выбран второй ролик, так как на нем наблюдается наибольшая нагрузка. Профиль роликов после эксплуатации измеряли прибором контроля формы модели 08500 (класс точности А) по 30 равноудаленным точкам по длине бочки.

В результате экспериментов были построены профилограммы износа бочки по длине ролика.

На рисунке 2 приведены профилограммы износа бочки по длине для второго ролика семироликовой РПМ в зависимости от длины обрабатываемого листового проката.

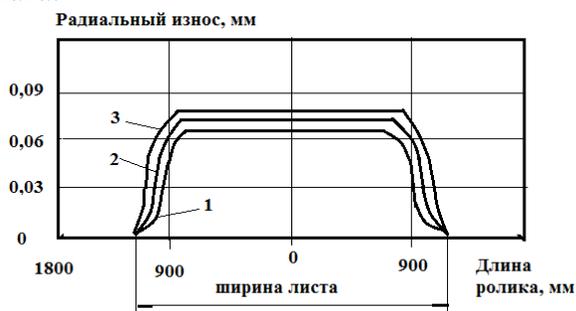


Рисунок 2. Профилограмма износа бочки по длине ролика для семироликовой РПМ в зависимости от длины обрабатываемого листового проката: 1- $L = 22000$ м, 2- $L = 23000$ м, 3- $L = 25000$ м

Анализ регрессионных уравнений для расчета износа бочек валков при прокатке полос [8,9] позволил выделить основные

факторы и разработать структуру уравнения регрессии для расчета износа бочек роликов РПМ.

Из рисунка 2 следует, что износ бочки ролика на участке равной ширине листа практически равномерен, что указывает на равномерность износа ролика по длине бочки на участке, контактирующем с обрабатываемым металлом.

После замеров износа и расчета параметров правки было составлено уравнение регрессии для вычисления износа роликов на правильной машине

$$\Delta Z_{\text{изн}} = -0,1347 + 9,013 \times 10^{-5} P + 2,52 \times 10^{-6} L + 0,00010 \sigma_s \quad (5)$$

где P - усилие правки, кН;

L - суммарная длина листов, обрабатываемых на РПМ, м;

σ_s - предел текучести металла листов, МПа;

Кроме проверки достоверности коэффициентов уравнения (5) были определены показатели значимости входящих в них факторов с использованием t -критерия Стьюдента, а также коэффициент множественной корреляции $R=0,95$ и критерий Фишера $F=22,7785$. Анализ показал, что все факторы, входящие в уравнения регрессии (5), являются значимыми.

Для расчета параметров правки необходимо знать истинный предел текучести материала листов. Истинный предел текучести материала листов определяли из диаграммы растяжения, полученной при испытаниях образцов на машине ИМ-4М в соответствии с ГОСТ 1497-84 (рисунок 3).

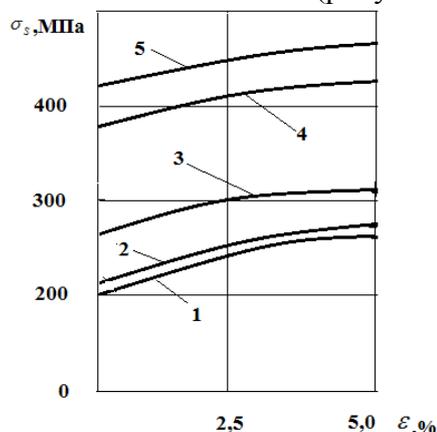


Рисунок 3. Диаграмма растяжения образцов из стали: 1, 2- СтЗсп; 3- 09Г2С; 4- 10ХСНД, 5- 16Г2АФ

Суммарную величину прогиба и износа бочки ролика по его длине определяли по формуле

$$\Delta = f + \Delta Z_{из}, \quad (6)$$

где f - упругий прогиб по середине бочки ролика от действия усилия правки, $\Delta Z_{из}$ - максимальный износ бочки ролика.

Для « j » - того сечения по ширине листа толщину листа записывали в виде:

$$h_i = h_c - \Delta \left(\frac{j \Delta y}{B/2} \right)^2, \quad (7)$$

где h_c - толщина листа по его середине,

B - ширина листа.

Пластический, упругий и упругопластический изгибающие моменты для цилиндрической бочки ролика определяли по формулам [1,2].

$$M_s = \sigma_s \frac{B h^2}{4}$$

$$M_y = \sigma_s \frac{B h^2}{6} \quad (8)$$

$$M_{s_y} = M_y (1 + k_j)$$

где k_j - коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листа. Подставляя величину толщины листа из зависимости (7) в формулы (8), получим

$$M_{s_i}^* = \sigma_s \frac{B h_i^2}{4}$$

$$M_{y_i}^* = \sigma_s \frac{B h_i^2}{6} \quad (9)$$

$$M_{s_{yi}}^* = M_{y_i}^* (1 + k_j)$$

В уравнениях (9) величина пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов определяется с учетом прогиба и износа бочки ролика. Изменение изгибающих моментов по ширине листа с учетом прогиба и износа бочки ролика, рассчитанных по зависимостям (9), приведено на рисунке 4.

Из рисунка 4 следует, что при прогибе и износе бочек роликов по их длине изгибающие моменты снижаются от середины к краям листа. Изменение изгибающих моментов необходимо учитывать при расчетах технологических параметров правки: усилия правки, крутящих моментов.

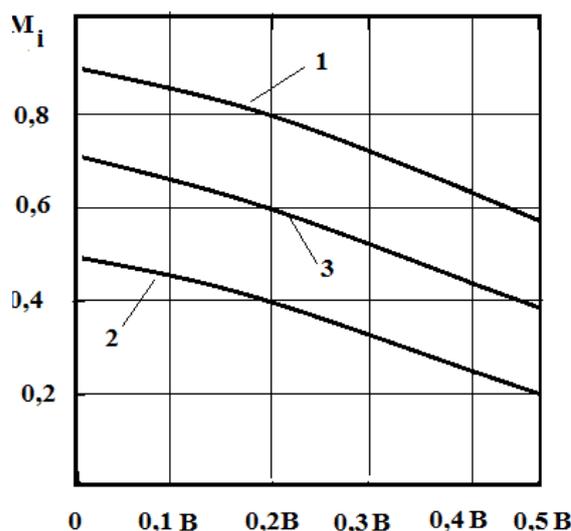


Рисунок 4. Изменение изгибающих моментов по ширине листа:

1- пластический момент, 2- упругий момент, 3- упруго-пластический момент

С учетом зависимостей (8), (9) относительную разность пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа с учетом изгиба и износа запишем в виде

$$\frac{\Delta M_s}{M_s} = -2 \frac{\Delta}{h_c} + \left(\frac{\Delta}{h_c} \right)^2,$$

$$\frac{\Delta M_y}{M_y} = -2 \frac{\Delta}{h_c} + \left(\frac{\Delta}{h_c} \right)^2, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta M_{ys}}{M_{ys}} = \frac{\Delta M_y}{M_y} (1 + k_j) .$$

Результаты расчета относительной разности пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа из стали 10ХСНД с учетом прогиба и износа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Относительная разность пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа с учетом прогиба и износа бочек роликов (сталь 10ХСНД)

№	Типоразмер	$\frac{\Delta M_s}{M_s}$	$\frac{\Delta M_y}{M_y}$	$\frac{\Delta M_{s_y}}{M_{s_y}}$
-	мм	%	%	%
1	10x2000	-15	-15	-15
2	20x2500	-20	-20	-20
3	30x2500	-23	-23	-23
4	40x2500	-31	-31	-31

Из таблицы 3 следует, что с увеличением толщины и ширины листа, выправляемого на РПМ, относительная разность пластического, упругого и упругопластического изгибающих моментов между серединой и краем листа снижается. Так, для $B \times h = 20 \times 2500$ мм величина $\Delta M_s / M_s$, $\Delta M_y / M_y$, $\Delta M_{s_y} / M_{s_y}$ снижается на 20 %, для $B \times h = 30 \times 2500$ мм величина $\Delta M_s / M_s$, $\Delta M_y / M_y$, $\Delta M_{s_y} / M_{s_y}$ снижается на 23 %.

Следовательно, для повышения точности расчетов величину изгибающих моментов, полученную из предположения постоянства толщины листа по его ширине рассчитанную по зависимости 8, необходимо увеличивать, применяя поправочный коэффициент « k_p »

$$\begin{aligned} M_s &= k_p M_s^* , \\ M_y &= k_p M_y^* , \\ M_{s_y} &= k_p M_{s_y}^* \end{aligned} \quad (11)$$

где M_s^* , M_y^* , $M_{s_y}^*$ - величина изгибающих моментов, полученная с учетом действия прогиба и износа бочки ролика.

M_s , M_y , M_{s_y} - величина изгибающих моментов, полученная из предположения постоянства толщины листа по его ширине (при цилиндрической бочке ролика),

k_p - поправочный коэффициент.

Величина поправочного коэффициента для расчетов изгибающих моментов с учетом прогиба и износа роликов РПМ представлена на рисунке 5.

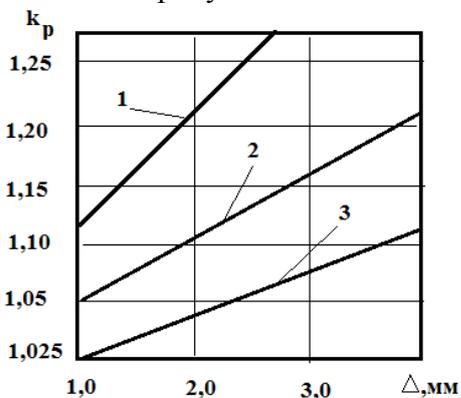


Рисунок 5. Величина поправочного коэффициента для расчетов изгибающих моментов с учетом прогиба и износа роликов РПМ (1- $h = 10$ мм, 2- $h = 20$ мм, 3- $h = 40$ мм)

Из рисунка 5 следует, что для толщины листа, изменяющейся от 20 мм до 40 мм, величина поправочного коэффициента изменяется от 1,025 до 1,25. Аналогичную методику для расчета поправочных коэффициентов необходимо использовать для повышения точности расчетов параметров правки (усилия правки, изгибающих моментов) при настройке правильной машины.

Заключение

1. Уточнена методика расчета параметров правки толстых листов, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов правильной машины (РПМ).

Установлено, что наличие прогиба и износа по длине бочек роликов приводит к снижению изгибающих моментов, создаваемых РПМ. Для корректного расчета изгибающих моментов, разработана методика расчета поправочного коэффициента, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов.

2. Разработана структура регрессионной модели износа бочек роликов на РПМ при правке листового проката. Модель учитывает усилие правки, суммарную длину листов, пропорциональную контактной пути, а также истинный предел текучести металла листов. Определены коэффициенты уравнения регрессии для ролика, испытывающего наибольшую нагрузку при правке листового проката. Регрессионная модель износа бочек роликов используется для расчета параметров правки, а также выработки технических и технологических решений по компенсации прогиба и износа по длине бочек роликов правильной машины.

Библиографический список

1. Мошнин Е.Н. Правка и гибка полос / Е.Н.Мошнин. – М.: Машиностроение, 1987. –132 с.
2. Слоним А.З. Машины для правки листового и сортового проката / А.З. Слоним, Л.А. Сонин. – М : Metallurgia, 1987. –132 с.
3. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на

- роликовых машинах Часть 1 . Методика расчета // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката – 2007. – №10. – С.34–37.
4. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на роликовых машинах Часть 2 . Примеры использования методики // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката – 2007. – №10. – С.36–38.
 5. Хольцмюллер Г. Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы. –2007. – № 6. – С.58–62.
 6. Бодини Л. Улучшение плоскостности толстых листов благодаря прогнозированию и оптимизации производства/ Л. Бодини, О.Эрих., М. Краухазен // Черные металлы. –2008. – № 11. – С.35–38.
 7. Кнапп С. Правка растяжением и изгибом и ее влияние на свойства холоднокатаных полос из качественных сталей / С.Кнапп, П.Функе, К. Киргоф, К. Вупперман // Черные металлы. 1995. – №2. – С. 49–53.
 8. Григорян Г.Г. Разработка статистической модели износа рабочих валков чистовой группы стана 2000 горячей прокатки / Г.Г.Григорян, В.А. Аленов, Р.Л. Шаталов, В.Е.Никитин, В.И. Скорупский, Н.П. Пличко // Изв. Вуз. Черная металлургия –1979. – №1. – С.88–91.
 9. Шаталов Р.Л. Регрессионная модель износа валков при горячей прокатке полос из сложнолегированных медных сплавов / Р.Л. Шаталов, Н.В.Характеров, С.А.Карпов – Производство проката – 2006. – №2. – С.42–45.

Information about the paper in English

Е.А. Maksimov, Е.Р. Ustinovsky
 Federal State Autonomous Educational Institution of
 Higher Education “South Ural State University
 (national research university)”
 FSAEIHE SUSU (NRU)
 Chelyabinsk, Russia
 Received 04.04.2018

CALCULATING PLATE LEVELING PARAMETERS FOR A ROLLER LEVELER SUBJECT TO BENDING
 AND WEAR OF ROLLER BODIES

Abstract

The paper presents a technique developed to calculate leveling parameters subject to bending and wear of bodies of rollers of the roller leveler.

A mathematical simulation showed that in case of bending and wearing of roller bodies along their length, bending moments decreased from the center to edges of plates. Such change in bending moments should be taken into account, when calculating leveling parameters: leveling force and torques.

Wear along bodies of rollers on a seven-roller leveler was under study.

The paper contains a regression equation with regard to wear along the roller body.

Keywords: plate leveling, roller leveler, bending and wear of roller bodies, technique to calculate leveling parameters
