

УДК 621.77

к.т.н. Денищенко П. Н.,  
Макаганюк А. С.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, alexandr\_jes@mail.ru)

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

*Работа посвящена физическому моделированию серповидности раската при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клети. Проверена сходимость физической модели серповидности раската с математической моделью.*

**Ключевые слова:** толстолистовая прокатка, четырехвалковая клеть, серповидность, само-выравнивание вытяжек по ширине раската, уширение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Качество металлопродукции является наиболее важным показателем конкурентоспособности производства. Черная металлургия должна продолжать расширение выпуска наукоемкой высокоэкономичной металлопродукции на основе внедрения новейших технических разработок [1]. Главное внимание должно уделяться расширению производства и повышению качества прогрессивных видов металлопродукции. К ним в первую очередь относится листовой прокат.

Наиболее актуальной проблемой при толстолистовой прокатке является получение требуемых размеров и формы листов. Улучшение рассматриваемых показателей обеспечивает более высокий уровень технологических и потребительских свойств, что способствует качеству и конкурентоспособности исследуемого вида металлопродукции. Однако, несмотря на имеющиеся успехи в области улучшения прямолинейности прокатываемых листов, некоторые принципиально важные вопросы остаются малоизученными.

В работе [2] представлена математическая модель, разработанная на основе вариационного принципа возможных изменений деформированного состояния (принцип Журдена). Решение уравнения Эйлера — Пуассона с подстановкой входной неравномерности в строки Фурье позволило получить выражение для коэффи-

циентов, учитывающих влияние поперечных смещений металла на уменьшение выходной неравномерности для каждой гармоники [3].

В связи с наличием ряда принятых допущений, которые могут снижать точность разработанной математической модели, возникает необходимость ее экспериментального подтверждения.

**Постановка задачи.** Работа посвящена проверке математической модели серповидности раската [2] при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клети. В этой связи необходимо проведение опытной прокатки на лабораторном четырехвалковом стане 200/500/400 кафедры ОМДиМ ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

В связи с этим **целью** настоящей работы является физическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке и проверка сходимости результатов физической модели с математической моделью [2].

**Объект исследования** — технологический процесс прокатки толстолистовой стали с неравномерной толщиной на выходе из валков четырехвалковой клети.

**Предмет исследования** — очаг пластической деформации металла неравномерной толщины на выходе из валков и с неравномерным распределением продольного и поперечного течения.

**Задачи** исследования:

– разработка физической модели серповидности раската при толстолистовой прокатке;

– оценка сходимости физической и математической моделей.

**Методика исследования.** С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели были проведены исследования методом физического моделирования (масштаб моделирования  $m=4,5$ ). Данный масштаб был определен из соотношения диаметров рабочих валков на стане 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС» ( $D_p=900$  мм) и на лабораторном стане кафедры ОМДиМ ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» ( $D_p=200$  мм) (рис. 1).

Перед прокаткой образцам с помощью механической обработки придавались строго прямоугольные сечения толщиной  $H$ , шириной  $B$ , длиной  $L$ .

При прокатке образцы толщиной  $H$  обжимали со средним обжатием  $\Delta h_{cp}$  с поперечной разнотолщиной, равной  $\delta$ , на каждой стороне образца (слева  $\Delta h_{cp}-\delta/2$ , справа  $\Delta h_{cp}+\delta/2$ ). Поперечная разнотолщина при прокатке создавалась перекосом верхних рабочего и опорного валков при помощи отдельного перемещения нажимных винтов  $\delta=h_n-h_l$ , где  $h_l$  и  $h_n$  — толщины левой и правой сторон образца после прокатки.

После опыта сравнивали удлинения правой стороны образца и левой (по ходу прокатки). Разница в длинах между левой и правой кромками после прокатки ( $\Delta L=L_l-L_{pr}$ ) говорит о наличии серповидности;  $L_l$ ,  $L_{pr}$  — длины соответственно левой и правой кромок после прокатки (рис. 2).

**Изложение материала и его результаты.** В качестве факторов использовались безразмерные величины:  $\Delta h_{cp}/B$ ,  $H/B$ ,  $\delta/B$ .

Использовались образцы из технического чистого свинца марки С1 (ГОСТ 3778–98).

Исходные размеры заготовок приведены в таблице 1.

Откликом служило отношение  $\Delta L/B$ , которое представляет собой суммарный тангенс угла поворота торца раската в го-

ризонтальной плоскости  $\varphi = \varphi_n + \varphi_z$  (рис. 2), где  $\varphi_n$ ,  $\varphi_z$  — углы поворота переднего и заднего торцов раската соответственно;  $b$  — ширина образца после прокатки ( $b=B+\Delta b$ );  $\Delta L_n$ ,  $\Delta L_z$  — разница в удлинениях кромок на переднем и заднем торцах ( $\Delta L = \Delta L_n + \Delta L_z$ ).



Рисунок 1 Лабораторный стан 200/500/400 кафедры ОМДиМ

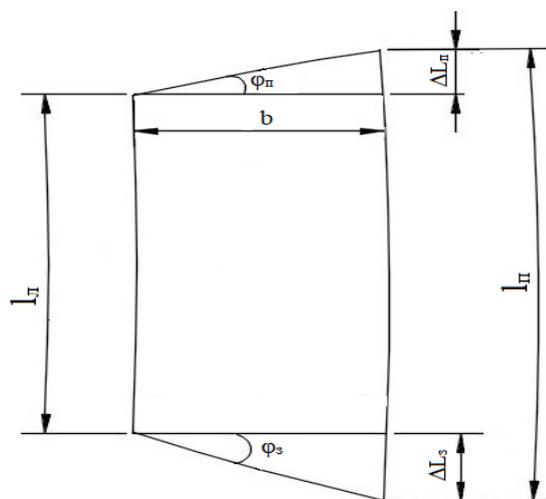


Рисунок 2 Схема измерения серповидности

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Размеры исходных заготовок

№	H <sub>л</sub> , мм	H <sub>п</sub> , мм	B, мм	L <sub>л</sub> , мм	L <sub>п</sub> , мм
1.1	12,41	12,41	271	108	108
1.2	12,40	12,40	271	108	108
1.3	12,42	12,42	271	108	108
2.1	2,02	2,02	355	109	109
2.2	2,01	2,01	356	106	105,5
2.3	2,00	2,00	356	104	105
3.1	12,49	12,49	356	110	109
3.2	12,50	12,50	356	109	109
3.3	12,50	12,50	356	109	109
4.1	2,02	2,02	271	100	100
4.2	2,03	2,03	271	102	100
4.3	2,01	2,01	271	100	100
5.1	7,18	7,18	311	109	108,5
5.2	7,20	7,20	314	109	108,5
5.3	7,21	7,21	314	109	109

Примечание: H<sub>л</sub> и H<sub>п</sub> — исходные толщины левой и правой сторон заготовки; L<sub>л</sub> и L<sub>п</sub> — исходные длины левой и правой сторон заготовки.

С целью минимизации числа опытов применили план дробного факторного эксперимента ДФЭ  $2^{3-1}$ . Для проверки линейности получаемого уравнения регрессии ставили также опыт в центре плана (на нулевом уровне). Матрица плана эксперимента представлена в таблице 2.

Так как используется двухуровневый план эксперимента, факторы принимают два значения: верхнего (+) и нижнего (-) уровней. Поэтому нужно знать, какие физические значения безразмерных параметров  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  соответствуют уровням (+) и (-). Для этого производим кодирование факторов. Результаты кодирования представлены в таблице 3.

Таблица 2

Матрица плана эксперимента

X <sub>1</sub> = H/B	X <sub>2</sub> = Δh <sub>ср</sub> /B	X <sub>3</sub> = δ/B	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
0,03511	0,00365	0,00062	+	+	+
0,00562	0,00154	0,00062	-	-	+
0,03511	0,00154	0,00008	+	-	-
0,00562	0,00365	0,00008	-	+	-
0,02037	0,00260	0,00035	0	0	0

Таблица 3

Кодирование факторов

Уровни и интервалы варьирования факторов	Π <sub>1</sub> = H/B	Π <sub>2</sub> = Δh <sub>ср</sub> /B	Π <sub>3</sub> = δ/B
Верхний уровень (Π <sub>g</sub> = +1)	0,03511	0,00365	0,00062
Нижний уровень (Π <sub>g</sub> = -1)	0,00562	0,00154	0,00008
Нулевой уровень (Π <sub>g0</sub> = 0)	0,02037	0,00260	0,00035
Интервал варьирования	0,01475	0,00105	0,00027

На основании полученных данных рассчитываем уравнение регрессии для факторов в безразмерном виде, используя следующие формулы.

Связь между кодированными ( $X_i$ ) и натуральными ( $\Pi_i$ ) значениями факторов выражается соотношением

$$X_i = (\Pi_g - \Pi_{g0}) / \Delta g. \quad (1)$$

Вычисление оценок коэффициентов регрессии  $a_i$  и свободного члена  $a_0$  производим методом наименьших квадратов с использованием зависимостей

$$a_0 = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N Y_i, \quad (2)$$

$$a_i = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N X_g Y_i, \quad (3)$$

где  $i$  — номер опыта;  $g$  — номер фактора;  $N$  — число опытов плана ДФЭ  $2^{3-1}$ ;  $Y_i$  — значение отклика в опыте.

Таким образом, уравнение регрессии в кодированных значениях факторов имеет вид

$$Y = -0,0005 - 0,102X_1 + 0,015X_2 + 0,092X_3. \quad (4)$$

Пределы изменения переменных исследуемого процесса представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Размеры образцов после прокатки

№	h <sub>л</sub> , мм	h <sub>п</sub> , мм	b, мм	l <sub>л</sub> , мм	l <sub>п</sub> , мм
1.1	11,2	11,1	272	118	120
1.2	11,2	11,1	274	118	120
1.3	11,2	11,1	274	118	120
2.1	1,56	1,51	356,0	148	150
2.2	1,56	1,51	356,5	142	143
2.3	1,56	1,51	357,0	141	142
3.1	11,3	11,1	358,0	116	120
3.2	11,32	11,15	358,0	117,5	122
3.3	11,31	11,1	358,0	118	119
4.1	1,48	1,28	272,0	131	153
4.2	1,48	1,28	272,0	133	163
4.3	1,48	1,28	273,0	132	157
5.1	6,35	6,24	314,0	123	126
5.2	6,35	6,24	315,0	123	127
5.3	6,35	6,24	313,0	124	126

Для перехода к натуральным значениям факторов производилось декодирование уравнения регрессии (4) с использованием соотношения (1). В результате численные значения коэффициентов регрессии  $a_i$  и свободного члена  $a_0$  изменились, и уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид

$$\frac{\Delta L}{B} = -0,099 - 6,930 \frac{H}{B} + 87,4 \frac{\Delta h_{cp}}{B} + 56,624 \frac{\delta}{B} \quad (5)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [3]. Статистические характеристики уравнения регрессии сведены в таблицу 5.

Проверка воспроизводимости эксперимента показала, что опыты являются равноточными: табличное значение критерия Кокрена при уровне значимости  $\alpha=0,05$ , числе степеней свободы  $\nu=2$  и количестве независимых оценок дисперсии  $k=4-G^T=0,7679$  больше эмпирического  $G^3$ . Следовательно, гипотеза об однородности ряда дисперсий подтверждается.

Значимость  $R$ , проверенная по t-критерию Стьюдента и F-критерию Фишера, показала, что гипотеза о равенстве коэффициента множественной корреляции нулю отвергается и связь считается статистически значимой.

Сравнением расчетных и экспериментальных значений в центре плана установлено, что расхождение составляет 6,50 %.

Следовательно, линейные модели являются достаточно хорошей аппроксимацией исследуемой функции.

Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента показала, что при  $\alpha=0,05$  все они значимы (расчетные значения коэффициентов больше табличного).

Из таблицы 5 видно, что значения  $S_{ад}^2$  существенно меньше  $S_y^2$ , поэтому величины  $S$  и  $\varepsilon$  определяются погрешностью эксперимента (то есть  $S_y^2$ ), а не погрешностью аппроксимации. Проверка адекватности модели по F-критерию Фишера показала достаточно хорошее соответствие полученной модели экспериментальным данным: расчетное значение F-критерия не превышает табличного значения:  $F_{5\%} = 19,0$  при  $\nu_1 = 2$  и  $\nu_2 = 2$ . Коэффициент множественной детерминации  $R_d > 0,75$ ; следовательно, модель работоспособна.

Проверка правильности вычислений коэффициентов регрессии производилась подстановкой в уравнения регрессии значений  $X_i$  опытов. Полученные значения  $Y$  соответствуют значениям откликов в опытах с точностью до ошибок округления.

Таблица 5  
Статистические характеристики уравнения регрессии

$G^3$	$F^3$	$R_d$	$S_{ад}^2$	$S$	$\varepsilon, \%$	$S_y^2$
0,6695	0,0064	0,998	$8,1 \cdot 10^{-8}$	6,50	4,93	$0,12 \cdot 10^{-4}$

Примечание:  $G^3$  — рассчитанное значение критерия Кокрена;  $F^3$  — рассчитанное значение критерия Фишера;  $R_d$  — коэффициент множественной детерминации;  $S_{ад}^2$  — дисперсия адекватности;  $S$  — максимальное отклонение;  $\varepsilon$  — средняя относительная погрешность;  $S_y^2$  — значение дисперсии воспроизводимости.

На рисунке 3 приведены графики зависимости суммарного угла поворота торцов раската  $\Delta L/B$ , полученные при различных значениях поперечной разнотолщинности  $\delta/B$ , вариации значения среднего абсолютного обжатия  $\Delta h/B$  и начальной толщины  $H/B$ , согласно плану эксперимента. Также был проведен сравнительный анализ между значениями, полученными в ходе опытов (плоскости 2, 3, 5), и рассчитанными по математической модели (плоскости 1, 4, 6).

Математическая модель, представленная в [2], с более точными коэффициентами вытяжки получена с учетом уширения

$$v_{л, n} = v_{вх} \left[ 1 + f \frac{h_x - H}{\Delta h} \cdot \frac{B_x - B}{\Delta b} + \varphi \frac{H - h_x}{\Delta h} \cdot \frac{b - B_x}{\Delta b} \right], \quad (6)$$

$$\Delta L_{л, n} = \frac{L \cdot h_0 \cdot v_{л, n} \cdot B_0}{l \cdot h_1 \cdot v_{ср} \cdot B_1}, \quad (7)$$

$$v_{ср} = \frac{v_{л} + v_{n}}{2}, \quad (8)$$

где  $v_{л}$ ,  $v_{n}$  — скорости выхода левой и правой кромок раската из валков, получаемые при расчете из формулы (6);

$v_{вх}$  — скорость задачи раската в валки;

$f$ ,  $\varphi$  — входные и выходные неравномерности скоростей течения металла;

$h_1$  — выходная толщина раската;

$h_x$ ,  $B_x$  — толщина и полуширина раската в нейтральном сечении;

$\Delta h$ ,  $\Delta b$  — абсолютное обжатие и полууширение;

$\Delta L_{л, n}$  — удлинение сторон раската, рассчитывается для каждой стороны отдельно;

$v_{ср}$  — средняя скорость выхода металла из валков.

Для проверки сходимости результатов, получаемых при помощи математической модели [2], были рассчитаны удлинения сторон раската с размерами согласно пла-

ну эксперимента. В ходе проверки правильности расчетов результаты расчетов сравнивали с данными, полученными при помощи физической модели. Для этого результаты опытов были умножены на исходный масштаб моделирования. Результаты проверки сведены в таблицы 6–7.

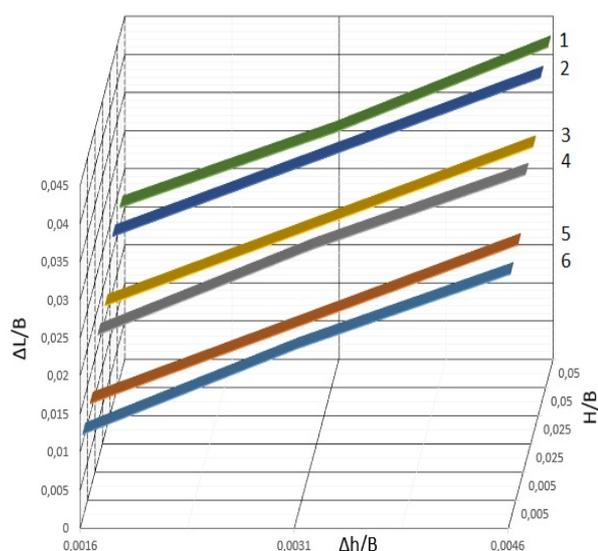


Рисунок 3 Зависимость суммарного угла поворота торцов раската при  $H/B = (0,00562...0,03511)$ ,  $\Delta h_{ср}/B = (0,00154...0,00365)$  и  $\delta/B = (0,00008...0,00062)$ , рассчитанных по математической (1, 4, 6) и физической (2, 3, 5) моделям

Таблица 6  
Сравнение экспериментальных и полученных значений удлинения левой кромки

H, мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta b$ , мм	$L_з$ , мм	$L_p$ , мм	$\Delta$ , %
55,85	5,90	2,25	540,00	542,00	0,37
55,80	5,85	6,75	540,00	537,00	-0,56
55,89	5,94	6,75	540,00	538,00	-0,37
9,09	2,30	2,25	675,00	654,00	-3,11
9,05	2,25	1,13	643,50	633,00	-1,63
9,00	2,21	2,25	639,00	617,00	-3,44
56,21	6,26	4,50	540,00	555,00	2,78
56,25	6,08	4,50	549,00	547,00	-0,36
56,25	6,30	4,50	535,50	550,00	2,71
9,09	3,33	2,25	688,50	704,00	2,25
9,14	3,38	2,25	733,50	721,00	-1,70

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 6

H, мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta b$ , мм	$L_3$ , мм	$L_p$ , мм	$\Delta$ , %
9,05	3,29	4,50	706,50	697,00	-1,34
32,36	4,28	6,75	567,00	560,00	-1,23
32,40	4,32	2,25	571,50	564,00	-1,31
32,45	4,37	2,25	567,00	565,00	-0,35

Примечание:  $L_3$ ,  $L_p$  — удлинения, полученные экспериментальным и расчетным путем;  $\Delta$  — относительная погрешность.

Таблица 7

Сравнение экспериментальных и полученных значений удлинения правой кромки

H, мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta b$ , мм	$L_3$ , мм	$L_p$ , мм	$\Delta$ , %
55,85	5,45	2,25	531,00	536,00	0,94
55,80	5,40	6,75	531,00	532,00	0,19
55,89	5,49	6,75	531,00	533,00	0,38
9,09	2,07	2,25	666,00	634,00	-4,80
9,05	2,03	1,13	639,00	612,00	-4,23
9,00	1,98	2,25	634,50	605,00	-4,65
56,21	5,36	4,50	522,00	538,00	3,07
56,25	5,31	4,50	528,75	538,00	1,75
56,25	5,36	4,50	531,00	538,00	1,32
9,09	2,43	2,25	589,50	615,00	4,33
9,14	2,48	2,25	598,50	618,00	3,26
9,05	2,39	4,50	594,00	608,00	2,36
32,36	3,78	6,75	553,50	547,00	-1,17
32,40	3,83	2,25	553,50	552,00	-0,27
32,45	3,87	2,25	558,00	555,00	-0,54

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В ходе проведения экспериментальных исследований методом планируемого эксперимента в лабораторных условиях получена работоспособная физическая мо-

дель серповидности раската при толстолистовой прокатке.

2. Модель учитывает неравномерное распределение деформаций по ширине очага деформации и поперечное течение металла в очаге пластической деформации. Установлен рост суммарного угла поворота торцов раската в исследованном диапазоне:  $H/B = (0,00562...0,03511)$ ,  $\Delta h_{cp}/B = (0,00154...0,00365)$  и  $\delta/B = (0,00008...0,00062)$  при увеличении перекося валков.

3. Полученное регрессионное уравнение, аппроксимированное линейной функцией, с достаточной точностью описывает разность удлинений торцов полосы по ширине раската применительно к условиям толстолиствого стана 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС».

4. Статистическая обработка результатов эксперимента показала значимость коэффициентов регрессии, работоспособность и адекватность модели, достаточную воспроизводимость экспериментальных данных. Данную модель можно использовать для прогнозирования серповидности раскатов с учетом уширения в условиях толстолиствого стана 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС» и на аналогичных толстолистовых станах.

5. Проведенными расчетами подтверждена сходимость разработанных физической и математической моделей серповидности раската при толстолистовой прокатке: максимальная относительная погрешность не превышает 4,8 %.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку модели серповидности с учетом температурного градиента по ширине раската.

## Библиографический список

1. Семенов, В. В. Совершенствование техники и технологии производства черных металлов — основной фактор устойчивого развития отрасли и повышения ее инвестиционной привлекательности [Текст] / В. В. Семенов, В. А. Углов // Черная металлургия. — 2018. — № 6. — С. 3–12.

2. Денищенко, П. Н. Математическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения [Текст] / П. Н. Денищенко, А. С. Макаганюк // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2020. — Вып. 61. — С. 77–83.

3. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента [Текст] / Г. И. Красовский. — Минск : Изд. БГУ, 1982. — 300 с.

© Денищенко П. Н.

© Макаганюк А. С.

*Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф ОМД ДонНТУ Снитко С. А., к.т.н., доц., пом. нач. СПЦ Филиала № 12 ЗАО «ВТС» по технологии Чичкан А. А.*

*Статья поступила в редакцию 26.11.2020.*

**PhD in Engineering Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S.** (*DonSTI, Alchevsk, LPR, alexander\_jes@mail.ru*)

**PHYSICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING**

*The work is devoted to physical modeling of the hot-rolled breakdown camber during thick-sheet rolling considering widening in a four-high stand. The convergence of physical model of the hot-rolled breakdown camber with mathematical model was verified.*

**Key words:** *thick-sheet rolling, four-high stand, camber, self-alignment of cogging back along the width of rolling, widening.*