

Макаганюк А. С.
асс. каф. ОМД и М,
Денищенко П. Н.
к.т.н., доц. каф. ОМД и М
 ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», г. Алчевск, ЛНР

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Форма раската в плане является одним из важнейших показателей качества листового проката, прежде всего толстолистого. Улучшения рассматриваемого показателя обеспечивает более высокий уровень технологических и потребительских свойств, что способствует качеству и конкурентоспособности исследуемого вида металлопродукции. Работа посвящена проверке математической модели [1] серповидности раската при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клетки. На основании математической модели, представленной в [1], была проведена опытная прокатка на базе лабораторного стана 200/500/400 кафедры ОМД и М ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». В качестве факторов использовались безразмерные величины: $\Delta h_{cp}/B$, H/B , δ/B (Δh_{cp} — среднее обжатие по ширине раската; H — исходная толщина перед прокаткой; δ — величина поперечной разнотолщинности (клиновидности); B — ширина раската перед проходом). Пределы изменения переменных исследуемого процесса представлены в таблицах 1–4.

Таблица 1 — Параметры эксперимента в натуральных величинах

Параметр	H, мм		Δh_{cp} , мм		δ , мм		B, мм	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Натуральный	9,00	56,25	2,48	5,85	0,12	0,99	1219,00	1602,00
Модель	2,00	12,50	0,55	1,30	0,03	0,22	271,00	356,00

Таблица 2 — Пределы изменения факторов в безразмерном виде

H/B			$\Delta h_{cp}/B$			δ/B		
мин	макс	сред	мин	макс	сред	мин	макс	сред
0,00562	0,03511	0,02037	0,00154	0,00365	0,00260	0,00007	0,00062	0,00035

Таблица 3 — Кодирование факторов

Уровни и интервалы варьирования факторов	П1 = H/B	П2 = $\Delta h_{cp}/B$	П3 = δ/B
Верхний уровень (Pg = +1)	0,03511	0,00365	0,00062
Нижний уровень (Pg = -1)	0,00562	0,00154	0,00007
Нулевой уровень (Pg0 = 0)	0,02037	0,00260	0,00035
Интервал варьирования	0,01475	0,00105	0,00027

Таблица 4 — Матрица плана ДФЭ 2^{3-1}

X1 = H/B	X2 = $\Delta h_{cp}/B$	X3 = δ/B	X1	X2	X3
0,03500	0,00600	0,00060	+	+	+
0,00740	0,00060	0,00060	-	-	+
0,03500	0,00060	0,00008	+	-	-
0,00740	0,00600	0,00008	-	+	-
0,02037	0,00260	0,00027	0	0	0

При прокатке образцы толщиной H обжимали со средним обжатием Δh_{cp} с поперечной разнотолщиной равной δ на каждой стороне образца (слева $\Delta h_{cp} + \delta/2$, справа $\Delta h_{cp} - \delta/2$). Поперечную разнотолщину, прямоугольным образцам придавали с помощью перекоса валков при помощи нажимного устройства. После опыта сравнивали удлинения правой стороны образца и левой (по ходу прокатки). Разность в длинах после прокатки ΔL , говорит о наличии серповидности.

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).

После проведенных опытов, из полученных результатов была составлена множественная регрессионная модель, которая описывает поведение раската от разных исходных данных.

Уравнение регрессии в кодированных значениях факторов имеет вид

$$Y = 0,0284 - 0,0204X_1 + 0,0066X_2 - 0,0036X_3. \quad (1)$$

Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид

$$\Delta L/B = 0,061 - 1,378 H/B + 6,276 \Delta h_{cp}/B - 14,340 \delta/B. \quad (2)$$

Проверка воспроизводимости эксперимента показала, что опыты являются равнозначными: 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 2,50 %.

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 ошибок 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: $F_{5\%} = 6,4$ 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.

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

Таблица 5 — Статистическая обработка результатов

$S_{[y]}^2$	$G_{табл}$	$G_{расч}$	$S_{ад}^2$	R	R^2	$F_{расч}$	$F_{табл}$
$0,12 \cdot 10^{-4}$	0,7679	0,7007	$3,34 \cdot 10^{-7}$	0,999	0,998	0,0005	6,400

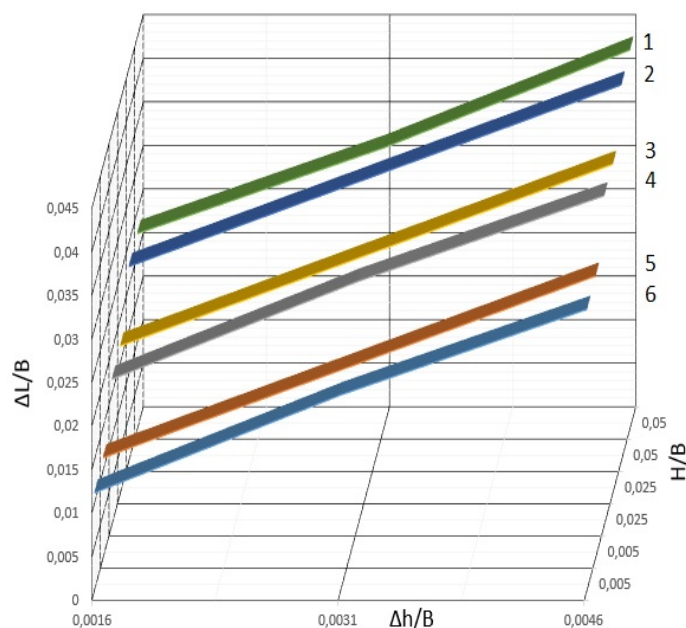


Рисунок 1 — Зависимость суммарного угла поворота торцов раската при $H/B = (0,00562...0,03511)$, $\Delta h_{cp}/B = (0,00154...0,00365)$ и $\delta/B = (0,00007...0,00062)$, рассчитанных по математической (1, 4, 6) и физической (2, 3, 5) моделям

В ходе проведения экспериментальных исследований методом планируемого эксперимента в лабораторных условиях получена работоспособная физическая модель серповидности раската при толстолистовой прокатке. 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 перекоса валков. 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».

Список литературы

1. Денищенко, П. Н. Математическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения / П. Н. Денищенко, А. С. Макаганюк // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2020. — Вып. 61. — С. 77–83.
2. Belskiy, S. M. Mathematical Model of hot-rolled Strip's Camber Formation/ S. M. Belskiy, I. P. Mazur // 8nd International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing. — Lipetsk State Technical University, 2016. — P. 5–7.
3. Бельский, С. М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки : автореф. дис. ... докт. техн. наук / С. М. Бельский. — Липецк, 2009. — 368 с.