

УДК 621.771.01

Федоринов В. А.
Севастьянов Б. С.
Картавенко А. С.
Никишин С. М.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЯХ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Многообразие задач, решаемых в рамках теоретических исследований различных процессов обработки металлов давлением, в том числе и процессов горячей прокатки на толстолистовых станах, делает целесообразным разработку математических моделей различного уровня, отличающихся между собой по композиционной сложности и, как следствие, по информативности, а также трудоёмкости их численной реализации. Так, например, рассмотренная численная математическая модель [1] позволяет в полной мере учесть реальный характер распределений граничных условий и, как следствие, с достаточной достоверностью определить весь комплекс локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке. Вместе с тем, структура данной математической модели, основанная на разбиении очага деформации на множество элементарных объемов, а также на организации нескольких контуров итерационных процедур, приводит к существенному повышению трудоемкости и затрат машинного времени при ее разовой численной реализации. Отмеченное, в свою очередь, делает весьма проблематичным использование моделей данного класса применительно к решению целого ряда многовариантных задач, какими, например, являются задачи имитационного автоматизированного управления и т. д.

Целью работы является разработка максимально простых регрессионных зависимостей на основе достаточно сложной численной математической модели, организованных в соответствии с элементами планируемого эксперимента, позволяющих решать многовариантные задачи с достаточной степенью достоверности и в реальном масштабе времени.

Указанное выше может быть проиллюстрировано на примере математического моделирования таких интегральных характеристик, какими являются сила и момент процесса горячей прокатки, а также величина межвалкового зазора. В качестве целевой функции в этом случае использовали численную математическую модель напряженно-деформированного состояния [1], а в качестве варьируемых факторов рассматривали исходную толщину листа h_0 и температуру прокатки t_0 .

В качестве же стратегии численной реализации математической модели напряженно-деформированного состояния, следуя рекомендациям работы [2] и учитывая нелинейный характер исследуемых зависимостей, были приняты рототабельные центральные некомпозиционные униформ-планы второго порядка, позволяющие с достаточной точностью описать факторное пространство в значительном диапазоне возможных условий реализации.

Непосредственно выбор факторов x_i и определение их уровней в каждом отдельном случае осуществляли на основе предварительных количественных и качественных оценок конкретной технологической схемы процесса горячей прокатки. В частности, рассматривали двухфакторное пространство, с учетом чего был использован двухфакторный симплекс-суммируемый план $C-C_2$ (см. табл. 1), с последующим аналитическим описанием исследуемых параметров y полиномом второго порядка вида [2]:

$$y = b_0 + \sum_1^2 b_i x_i + \sum_1^2 b_{ii} x_i^2 + \sum_1^2 b_{ij} x_i x_j . \quad (1)$$

Для улучшения модели введем в нее нелинейные члены, которые учитывают произведения и квадраты факторов. Существенно при этом, что новые расчеты проводить не нужно.

Таблица 1

Матрица симплекс – суммируемого плана ($C - C_2$), $k = 2$ для построения квадратичной модели

Номер опыта	Фактор	
	x_1	x_2
1	-1	0
2	+1	0
3	+0,5	+0,87
4	+0,5	-0,87
5	-0,5	+0,87
6	-0,5	-0,87
7	0	0

Результаты и их статическая оценка сведены в табл. 3–5.

Таблица 2

Факторы и количественные оценки их уровней, используемые при регрессионном аналитическом описании параметров процесса горячей прокатки

x_1					x_2		
$h_0, мм$					$t, °C$		
-1	+1	+0,5	-0,5	0	0	+0,87	-0,87
6,6	7,4	7,2	6,8	7	850	880,45	819,55

Из анализа представленных результатов (см. табл. 3–5) является очевидным, что сила P , момент M и величина межвалкового зазора S_0 процесса прокатки листа толщиной $h_1 = 5 мм$ в рамках рассматриваемого факторного пространства (см. табл. 2) с достоверной степенью точности могут быть описаны регрессионными зависимостями вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (2)$$

где b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты регрессии, количественные оценки которых для определения соответствующих характеристик представлены в табл. 5;

$\tilde{x}_i = \frac{x_i - 0,5(x_i^e + x_i^n)}{0,5(x_i^e - x_i^n)}$, $i = 1, 2, \dots, n$ – кодированные факторы, используемые для удобства построения модели и дальнейшего её анализа, каждый из которых принимает значение +1 (при $x_i = x_i^e$) и -1 (при $x_i = x_i^n$), где x_i^e и x_i^n – верхнее и нижнее натуральные значения факторов соответственно.

Найденные коэффициенты регрессии подставляются в полином общего вида (1). После подстановки получим следующие полиномиальные зависимости:

$$P = 23,8155 + 5,4913x_1 - 4,0442x_2 - 0,6791x_1x_2 + 0,3059x_1^2 + 1,2946x_2^2; \quad (3)$$

$$M = 0,527967 + 0,1697x_1 - 0,08989x_2 - 0,02305x_1x_2 + 0,015008x_1^2 + 0,028777x_2^2; \quad (4)$$

$$S_0 = 1,4627 - 0,7851x_1 + 0,5788x_2 + 0,0914x_1x_2 + 0,06x_1^2 + 0,0159x_2^2, \quad (5)$$

где $x_1 = \frac{h_0 - 7,0}{0,4}$; $x_2 = \frac{t - 850}{35}$.

Таблица 3

Симплекс – суммируемый план ($C - C_2$) и результаты его численной реализации применительно к регрессионному аналитическому описанию значений силы P момента M и величины межвалкового зазора S_0 процесса горячей прокатки листа толщиной $h_1 = 5$ мм

№ опыта	Значение фактора				Эффект взаимодействия	Квадрат фактора		$S_0, мм$		$P, МН$		$M, МН \cdot м$	
	x_1		x_2			$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	Точное	Расчетное	Точное	Расчетное	Точное
	Кодированное	Натуральное, мм	Кодированное	Натуральное, °C									
1	-1	6,6	0	850	0	+1	0	2,31305	2,3078	18,7501	18,6301	0,376291	0,373275
2	+1	7,4	0	850	0	+1	0	0,745983	0,7376	29,7199	29,6127	0,714713	0,712675
3	+0,5	7,2	+0,87	880,45	+0,435	+0,25	+0,7569	1,62032	1,6405	23,6095	23,8036	0,546178	0,550119
4	+0,5	7,2	-0,87	819,55	-0,435	+0,25	+0,7569	0,543649	0,55387	31,1678	31,4314	0,721032	0,726581
5	-0,5	6,8	+0,87	880,45	-0,435	+0,25	+0,7569	2,32973	2,34608	18,6907	18,9032	0,395365	0,400473
6	-0,5	6,8	-0,87	819,55	+0,435	+0,25	+0,7569	1,41056	1,41849	25,0781	25,3493	0,530477	0,536828
7	0	7	0	850	0	0	0	1,50346	1,4627	24,4955	23,8155	0,543099	0,527967

Таблица 4

Точностная и статистическая оценки результатов численной реализации плана

Номер опыта	$\Delta S_0, мм$	$\delta S_0, \%$	S_{0p} / S_0	$\Delta P, МН$	$\delta P, \%$	P_p / P	$\Delta M, МН \cdot м$	$\delta M, \%$	M_p / M
1	0,00525	0,226973	1,002275	0,12	0,639997	1,006441	0,003016	0,801507	1,00808
2	0,008383	1,123752	1,011365	0,1072	0,360701	1,00362	0,002038	0,285149	1,00286
3	-0,02018	-1,24543	0,987699	-0,1941	-0,82213	0,991846	-0,00394	-0,72156	0,992836
4	-0,01022	-1,88007	0,981546	-0,2636	-0,84574	0,991613	-0,00555	-0,76959	0,992363
5	-0,01635	-0,7018	0,993031	-0,2125	-1,13693	0,988759	-0,00511	-1,29197	0,987245
6	-0,00793	-0,56219	0,99441	-0,2712	-1,08142	0,989301	-0,00635	-1,19722	0,988169
7	0,04076	2,71108	1,027866	0,68	2,77602	1,028553	0,015132	2,786232	1,028661
Среднее	-	-	0,999742	-	-	1,000019	-	-	1,000031

Таблица 5

Расчетные значения коэффициентов регрессии при аналитическом описании значений силы P_p , момента M_p и величины межвалкового зазора S_{0p}

Коэффициент	$S_{0p}, мм$	$P_p, МН$	$M_p, МН \cdot м$
b_0	1,4627	23,8155	0,527967
b_1	-0,7851	5,4913	0,1697
b_2	0,5788	-4,0442	-0,08989
b_{12}	0,0914	-0,6791	-0,02305
b_{11}	0,06	0,3059	0,015008
b_{22}	0,0159	1,2992	0,028777

В частности, относительная погрешность P определения силы прокатки в соответствии с зависимостью (2) P_p по отношению к аналогичному значению P , предоставляемому численной математической моделью составила $\delta P = (-0,14...2,78)\%$, а среднее выборное значение соотношения P_p / P составило 1,000019. Аналогично и с точки зрения момента прокатки и величины межвалкового зазора: $\delta S_0 = (-1,88...2,71)\%$, $(\overline{S_{0p}} / S_0) = 0,999742$; $\delta M = (-1,29...2,79)\%$, $(\overline{M_p} / M) = 1,000031$. Всё это подтверждает возможность использования полученных регрессионных моделей для решения широкого круга задач, связанных с анализом и совершенствованием технологий и оборудования процесса горячей прокатки на толстолистовых станах.

ВЫВОДЫ

На основе теории планирования эксперимента получены аналитические регрессионные зависимости, используемые для расчета энергосиловых параметров процесса горячей прокатки, которые позволяют снизить трудоемкость и затраты машинного времени при разовой численной реализации, что весьма проблематично при использовании достаточно сложных математических моделей, применительно к решению целого ряда задач, таких как автоматизированное управление основными показателями качества по точности листового проката, получение листов с минимальными продольной и поперечной разнотолщинностью, при обеспечении их высокой плоскостности, что достигается в настоящее время применением гидравлических нажимных механизмов и систем противоизгиба валков. Все это, в своей совокупности и сочетании, подтверждает необходимость получения максимально простых аналитических описаний сложных математических моделей, позволяющих решать такие многовариантные задачи с достаточной степенью достоверности в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос / В. Ф. Потапкин. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – 316 с.
2. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов. – Киев – Донецк : Вища школа, 1982. – 120 с.

Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф. ДГМА;
 Севастьянов В. С. – студент ДГМА;
 Картавенко А. С. – студент ДГМА;
 Никишин С. М. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua