

УДК 621.771.2

Сатонин А. В.
Коробко Т. Б.
Коренко М. Г.
Миرونенко Е. В.

РЕГРЕССИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СОРТОВЫХ ПОЛОСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Постоянные требования к улучшению качества продукции и эффективности производства диктуют необходимость повышения степени научной обоснованности принимаемых технических решений на основе дальнейшего развития методов автоматизированного расчета и проектирования соответствующих технологий и оборудования, а также разработки и внедрения практических рекомендаций, направленных на их совершенствование.

На основе численных рекуррентных решений конечно-разностных форм условия баланса энергетических затрат и статического равновесия, рассматриваемых в выделенных элементарных объемах, полученных путем разбиения зоны пластического формоизменения, зоны упругого восстановления и прикромочной зоны по их длине и ширине получили развитие математические модели напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке сортовых полосовых профилей [1–3]. При этом основными отличительными особенностями данных математических моделей являются:

- расчет всего комплекса локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла с учетом реального характера распределений геометрических параметров очага деформации, механических свойств прокатываемого металла, кинематических параметров и условий внешнего контактного трения по длине очага деформации;
- учет междеформационного разупрочнения, упругого сплющивания рабочих валков и наличия прикромочного эффекта, обуславливающего снижение интегральных характеристик энергосиловых параметров;
- количественная оценка текущих и результирующих показателей степени использования запаса пластичности металла по основной центральной части и по кромкам прокатываемых заготовок, обеспечивающая возможность прогнозирования вероятности появления дефекта разрыва кромки.

Целью работы является разработка максимально простых регрессионных зависимостей, применительно к численной модели, для расчета энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей.

Для математических моделей по расчету энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей, а также конструктивных параметров оборудования важен не только достаточный объем и степень достоверности получаемых результатов, но и достаточно высокая степень быстродействия, обеспечивающая возможность использования для решения многовариантного плана, которыми являются задачи оптимизации, а также их автоматизированного проектирования и управления качеством готового проката.

С целью обеспечения численной реализации программных средств по автоматизированному расчету энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей в реальных для современных систем автоматического регулирования масштабах затрат машинного времени на основе разработанных ранее численных математических моделей [1–3] в сочетании с элементами теории планируемого эксперимента, разработаны простые и быстродействующие регрессионные математические модели по расчету энергосиловых параметров исследуемой технологической схемы. При этом согласно рекомендациям работы [4], учитывая нелинейный характер рассматриваемых зависимостей [1], в качестве используемой стратегии принят симметричный композиционный план второго порядка. Непосредственно выбор факторов и определение их уровней в каждом отдельном случае осуществляли на основе предварительных количественных и качественных оценок, а также с учетом предполагаемого назначения конкретного аналитического решения.

В частности, применительно к наиболее простым технологическим схемам использовали трехфакторное пространство, при котором в качестве варьируемых величин были приняты: X_1 – исходная h_0 , X_2 – конечная h_1 толщина и X_3 – температура t прокатываемой заготовки. При расширении марочного состава прокатываемых сталей в качестве дополнительного четвертого фактора X_4 – использовали показатель механических свойств σ_{s0} , а при учете возможности стохастического изменения условий внешнего контактного трения рассматривали и дополнительный пятый фактор X_5 – коэффициент пластического трения μ_0 .

С учетом возможных условий реализации процесса асимметричной прокатки в последней чистовой рабочей клетке в качестве шестого варьируемого фактора X_6 принят показатель степени кинематической асимметрии K_v , определяемый как соотношение окружных скоростей ведущего и ведомого рабочих валков $K_v = V_{61}/V_{62}$. В качестве откликов, то есть исследуемых параметров, во всех случаях использовали приведенные к единице ширины B значения силы P/B и моментов M_1/B , M_2/B , $M_{\Sigma_{чм}}/B$ процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей.

В качестве примера построения регрессионной математической модели может быть рассмотрен процесс горячей прокатки полос из низкоуглеродистых сталей в рабочих валках радиусом 150 мм, характерным для последних чистовых рабочих клетей целого ряда мелко- и среднесортных станков [1]. Используемое в этом случае количественное описание пятифакторного пространства, иллюстрировано табл. 1, а общая стратегия пятифакторного плана H_{a5} [4] и результаты его численной реализации на основе численных одномерных математических моделей по отношению к приведенным значениям силы $P_{чм}/B$ и суммарному моменту $M_{\Sigma_{чм}}/B$ прокатки представлены в табл. 2, 3.

Таблица 1

Факторы и количественные оценки их уровней, используемые при пятифакторном кодированном регрессионном аналитическом описании энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей

X1			X2			X3			X4			X5		
h ₀ , мм			h ₁ , мм			t°, C			σ _{s0} , МПа			μ ₀		
+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
5,5	5,0	4,5	3,3	3,0	2,7	950	900	850	90	82	74	0,33	0,3	0,27

В качестве регрессионного описания в этом случае, следуя рекомендациям работы [4], использовали зависимость вида:

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \\
 & + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{55}x_5^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + \\
 & + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij} – коэффициенты регрессии, методика определения которых представлены в работе [4].

Полученные с учетом изложенного выше, а также с учетом результатов численной реализации (см. табл. 1–3), конечные аналитические регрессионные зависимости для определения приведенных значений силы $P_{рм}/B$ и суммарного момента $M_{рм}/B$ прокатки имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_{рм}/B = & 11.43 + 1.12x_1 - 0.89x_2 - 1.76x_3 + 1.27x_4 + 0.48x_5 - 0.14x_1^2 - \\
 & - 0.04x_2^2 + 0.24x_3^2 + 0.03x_4^2 + 0.25x_{12} - 0.19x_{13} + 0.05x_{14} + 0.13x_{15} + \\
 & + 0.07x_{23} - 0.15x_{24} - 0.04x_{25} - 0.16x_{34} - 0.17x_{35} - 0.02x_{45}, \text{ кН/мм}; \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{\Sigma PM} / B = & 0.646 + 0.085x_1 - 0.06x_2 - 0.123x_3 + 0.088x_4 + 0.061x_5 - \\
& - 0.006x_1^2 - 0.0014x_2^2 + 0.017x_3^2 + 0.003x_4^2 + 0.002x_5^2 + \\
& + 0.012x_{12} - 0.015x_{13} + 0.006x_{14} + 0.012x_{15} + 0.006x_{23} - \\
& - 0.013x_{24} - 0.005x_{25} - 0.015x_{34} - 0.016x_{35} + 0.003x_{45}, \text{ кНм/мм.} \quad (3)
\end{aligned}$$

Таблица 2

Пятифакторный план N_{a5} и результаты его численной реализации применительно к регрессионному аналитическому описанию приведенной силы P/B при горячей прокатке сортовых полосовых профилей из низкоуглеродистых сталей

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$P_{чм} / B$	$P_{рм} / B$	X_p	$\delta P, \%$
+	+	+	+	+	11,55	11,54	1,0009	0,087
-	-	+	+	+	11,34	11,35	0,9991	0,0881
-	+	-	-	-	9,07	9,08	0,9989	0,1101
+	-	-	-	-	12,85	12,85	1	0
-	+	-	+	+	12,38	12,38	1	0
+	-	-	+	+	17,66	17,65	1,0006	0,057
+	+	+	-	-	8,6	8,59	1,0012	0,116
-	-	+	-	-	8,36	8,38	0,9976	0,2387
-	+	+	+	-	8,46	8,49	0,9965	0,3534
+	-	+	+	-	12,02	12,03	0,9992	0,0831
+	+	-	-	+	13,25	13,23	1,0015	0,151
-	-	-	-	+	12,18	12,18	1	0
-	+	+	-	+	7,05	7,05	1	0
+	-	+	-	+	10,48	10,47	1,001	0,096
+	+	-	+	-	14,5	14,5	1	0
-	-	-	+	-	14,22	14,24	0,9986	0,1404
0	0	0	0	0	11,44	11,43	1,0009	0,087
+	0	0	0	0	12,33	12,4	0,9944	0,5645
-	0	0	0	0	10,25	10,19	1,0059	0,589
0	+	0	0	0	10,48	10,49	0,999	0,0953
0	-	0	0	0	12,29	12,28	1,0008	0,081
0	0	+	0	0	9,90	9,88	1,002	0,202
0	0	-	0	0	13,37	13,4	0,9978	0,2239
0	0	0	+	0	12,77	12,73	1,0031	0,314
0	0	0	-	0	10,14	10,19	0,9951	0,4907
0	0	0	0	+	11,85	11,92	0,9941	0,5872
0	0	0	0	-	11,01	10,95	1,0055	0,548

Относительная погрешность регрессионных аналитических описаний $P_{рм}, M_{\Sigma PM}$ по отношению к аналогичным более строгим численным решениям $P_{чм}, M_{\Sigma чм}$ [1] в этом случае не превысила 1 % с точки зрения силы $\delta P = 100(P_{рм} - P_{чм}) / P_{чм}$ и 5 % с точки зрения момента $\delta M = 100 \times (M_{\Sigma PM} - M_{\Sigma чм}) / M_{\Sigma чм}$ прокатки (см. табл. 2, 3), что подтверждает правомерность регрессионного подхода. Для дальнейшего использования полученных зависимостей выполнены следующие декодировки $x_{1i} = (h_{0i} - \bar{h}_0) / \delta h_0$, $x_{2i} = (h_{1i} - \bar{h}_1) / \delta h_1$, $x_{3i} = (t_{0i} - \bar{t}_0) / \delta t$, $x_{4i} = (\sigma_{s0i} - \bar{\sigma}_{s0}) / \delta \sigma_{s0}$, $x_{5i} = (\mu_{0i} - \bar{\mu}_0) / \delta \mu_0$ при решении задач, требующих минимальных затрат машинного времени используемой вычислительной техники.

Таблица 3

Пятифакторный план N_{a5} и результаты его численной реализации применительно к регрессионному аналитическому описанию приведенного суммарного момента M/B при горячей прокатке сортовых полосовых профилей из низкоуглеродистых сталей

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$M_{чм} / B$	$M_{рм} / B$	X_M	$\delta M, \%$
+	+	+	+	+	0,689	0,688	1,001	-0,145
-	-	+	+	+	0,654	0,655	0,998	0,153
-	+	-	-	-	0,464	0,465	0,998	0,215
+	-	-	-	-	0,724	0,724	1,000	0,000
-	+	-	+	+	0,752	0,751	1,001	-0,133
+	-	-	+	+	1,159	1,158	1,001	-0,086
+	+	+	-	-	0,451	0,451	1,000	0,000
-	-	+	-	-	0,419	0,421	0,995	0,475
-	+	+	+	-	0,424	0,423	1,002	-0,236
+	-	+	+	-	0,675	0,676	0,999	0,148
+	+	-	-	+	0,816	0,814	1,002	-0,246
-	-	-	-	+	0,717	0,717	1,000	0,000
-	+	+	-	+	0,371	0,371	1,000	0,000
+	-	+	-	+	0,617	0,616	1,002	-0,162
+	+	-	+	-	0,801	0,841	0,881	4,891
-	-	-	+	-	0,769	0,797	0,965	3,513
0	0	0	0	0	0,647	0,646	1,002	-0,155
+	0	0	0	0	0,721	0,753	0,958	4,250
-	0	0	0	0	0,559	0,555	1,007	-0,721
0	+	0	0	0	0,583	0,585	0,997	0,342
0	-	0	0	0	0,706	0,705	1,001	-0,142
0	0	+	0	0	0,543	0,541	1,004	-0,370
0	0	-	0	0	0,783	0,786	0,996	0,382
0	0	0	+	0	0,739	0,738	1,001	-0,136
0	0	0	-	0	0,559	0,561	0,996	0,357
0	0	0	0	+	0,702	0,708	0,992	0,847
	0	0	0	-	0,593	0,587	1,010	-1,022

Аналогичные решения могут быть получены и непосредственно в декодированном виде, иллюстрируемом на примере четырехфакторного пространства, исключая вследствие незначительного влияния коэффициент внешнего контактного трения μ_0 , а соответствующие им регрессионные зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_{рм} / B = & 240,92 + 35,66h_0 - 37,99h_1 - 0,50t - 0,56\sigma_{s_0} - 4,79h_0^2 + \\
 & + 2,18h_1^2 + 2,17 \times 10^{-4}t^2 + 7,43 \times 10^{-3}\sigma_{s_0}^2 + 0,52h_0h_1 + 0,013h_0t + \\
 & + 0,01h_0\sigma_{s_0} + 0,018h_1t + 1,16 \times 10^{-3}h_1\sigma_{s_0} - 5,87 \times 10^{-4}t\sigma_{s_0}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

$0,990 < X_{pi} < 1,016.$

$$\begin{aligned}
 M_{рм} / B = & 21,07 + 2,97h_0 - 3,12h_1 - 0,047t - 0,023\sigma_{s_0} - 0,38h_0^2 + \\
 & + 0,207h_1^2 + 2,15 \times 10^{-5}t^2 + 5,76 \times 10^{-4}\sigma_{s_0}^2 + 8,56 \times 10^{-5}h_0h_1 + 0,011h_0t + \\
 & + 0,001h_0\sigma_{s_0} + 0,016h_1t - 9,302 \times 10^{-4}h_1\sigma_{s_0} - 6,15 \times 10^{-5}t\sigma_{s_0}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

$0,992 < X_{pi} < 1,024.$

Статистическая оценка доверительных интервалов, выполненная при доверительной вероятности 0,95, подтверждает возможность использования полученных регрессионных зависимостей в качестве математического обеспечения быстродействующих систем автоматического регулирования.

ВЫВОДЫ

Получены на основе численных математических моделей, реализованных в соответствии с элементами теории планируемого эксперимента, регрессионные аналитические описания энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сортовых полосовых профилей.

Такие математические модели характеризуются минимальной трудоемкостью и максимальным быстродействием при решении многовариантных задач автоматизированного проектирования технологических режимов обжатий и моделирования систем автоматического управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке относительно тонких лент и полос / А. В. Сатонин, С. С. Настоящая, М. Г. Коренко, В. Г. Переходченко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010 – № 4 (25) – С. 31–36.*
2. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке тонких полос / В. И. Капланов, А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, С. С. Настоящая // *Металлургическая и горнорудная промышленность, 2011. – Вып. 4. – С. 45–48.*
3. Сатонин А. В. Расчет напряжений и деформаций по кромкам прокатываемых лент и полос / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, И. С. Сухоруков // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2011. – Вып. 5/7 – С. 63–66.*
4. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов. – Киев – Донецк : Вища школа, 1982. – 120 с.

REFERENCES

1. Chislennoe matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri gorjachej prokatke odnositel'no tonkih lent i polos / A. V. Satonin, S. S. Nastojashhaja, M. G. Korenko, V. G. Perehodchenko // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2010 – № 4 (25) – S. 31–36.*
2. Chislennoe matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno- deformirovannogo sostojanija metalla pri gorjachej prokatke tonkih polos / V. I. Kaplanov, A. V. Satonin, M. G. Korenko, S. S. Nastojashhaja // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost', 2011. – Vyp. 4. – S. 45–48.*
3. Satonin A. V. Raschet naprjazhenij i deformacij po kromkam prokatyvaemyh lent i polos / A. V. Satonin, M. G. Korenko, I. S. Suhorukov // *Vostochno-Evropeskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2011. – Vyp. 5/7 – S. 63–66.*
4. Kovshov V. N. Postanovka inzhenerenogo jeksperimenta / V. N. Kovshov. – Kiev – Doneck : Vishha shkola, 1982. – 120 s.

Сатонин А. В.	– д-р техн. наук, проф. ДГМА
Коробко Т. Б.	– канд. техн. наук, доц. ДонГТУ
Коренко М. Г.	– канд. техн. наук, доц. КМИ ГВУЗ «КНУ»
Мироненко Е. В.	– д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Менеджмент» ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

КМИ ГВУЗ «КНУ» –Криворожский металлургический институт Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua, marinak2010@bk.ru, korobko.tamara@rambler.ru