

Т.А. Желдак, канд. техн. наук, Д.Н. Гаранжа
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА И ВЫБОР НАИБОЛЕЕ АДЕКВАТНОЙ МОДЕЛИ

Введение. Постановка проблемы.

Главным способом обработки металлов является *прокатка*, при которой исходная заготовка обжимается вращающимися валками прокатного стана в целях уменьшения поперечного сечения заготовки и придания ей заданной формы. В настоящее время широко распространена технология непрерывной разливки стали с последующей непрерывной прокаткой, что снижает себестоимость металла на 8–10% при улучшении характеристик проката.

При непрерывной прокатке обрабатываемый металл находится одновременно в нескольких клетях, что ускоряет процесс обработки и снижает энергозатраты на повторный нагрев металла между циклами прокатки. Однако такой процесс требует высокой точности и слаженности работы всех механизмов прокатного стана, поскольку существует ряд факторов, негативно влияющих на процесс формообразования проката и его механические свойства: неравномерность температуры прокатываемой заготовки, непостоянство площади контактной поверхности, изменение длины линии контакта валков и прокатываемой заготовки, уширение полосы (наплыв), скольжение валков по контактной поверхности, опережение, а также различие структуры металла по длине раската.

Для получения требуемых геометрии и механических свойств прокатываемого металла применяются системы автоматического регулирования скорости прокатки, обеспечивающие согласование режимов работы клеток с учётом влияния упомянутых факторов. На начальном этапе разработки такой системы следует произвести выбор и обоснование модели процесса обработки металла давлением, расчет момента прокатки, как основной составляющей нагрузки главного электропривода клетки.

Анализ исследований и публикаций по проблеме.

В выражениях, описывающих механические процессы в клетях прокатного стана при обработке металла давлением, рассматриваются два различных подхода к расчету момента прокатки – с определением удельного давления металла на валки и без определения удельного давления [1]. Первый подход расчета подразделяется на две различные группы – эмпирические и теоретические.

Среди эмпирических формул расчета наиболее распространено выражение Эжелунда [2]

$$p_{cp} = (1 + m)(2k + \eta u), \text{ кГ/мм}^2, \quad (1)$$

где m – коэффициент, характеризующий влияние внешнего трения на удельное давление; $2k$ – удельное сопротивление при статическом сжатии, кГ/мм^2 ; η – вязкость прокатываемого металла, $\text{кГ}\cdot\text{с/мм}^2$; u – скорость деформации, с^{-1} .

Первый член уравнения (1) учитывает увеличение сопротивления деформации вследствие трения прокатываемого металла о поверхность валков. Коэффициент m определяется как:

$$m = \frac{1,6\mu\sqrt{r(h_0 - h_1)} - 1,2(h_0 - h_1)}{h_0 - h_1}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения; r – радиус валка, мм; h_0 и h_1 – соответственно начальная и конечная высота прокатываемой заготовки, мм.

На величину коэффициента трения оказывает влияние состояние поверхности валков, температура прокатываемого металла и скорость прокатки. В [1] рекомендуются следующие выражения для расчета μ :

1,05 – 0,0005 t – 0,056 v – для стальной поверхности валков;

0,94 – 0,0005 t – 0,056 v – для закаленных чугуновых валков;

0,82 – 0,0005 t – 0,056 v – для шлифованных стальных или чугуновых закаленных валков.

Второй член уравнения (1) учитывает сопротивление деформации при отсутствии внешнего трения в направлении прокатки. Влияние скорости прокатки на сопротивление деформации отображено в произведении величин $\eta \cdot u$.

Скорость деформации можно представить выражением:

$$u \approx \frac{2v\sqrt{\frac{\Delta h}{r}}}{h_0 - h_1}, \quad (3)$$

где v – окружная скорость валков, мм/с.

Входящие в уравнение (1) величины $2k$ и η для заданной температуры и марки стали можно записать следующим образом:

$$2k = (14 - 0,01t)(1,4 + C + Mn + 0,3Cr), \text{ кГ/мм}^2; \quad (4)$$

$$\eta = 0,01(14 - 0,01t) \cdot c, \text{ кГ}\cdot\text{с/мм}^2, \quad (5)$$

где t – температура прокатки, °С; C – содержание углерода, %; Mn – содержание марганца, %; Cr – содержание хрома, %; c – коэффициент, зависящий от скорости прокатки, при $v < 6\text{м/с}$, рекомендуется принять $c = 1$ [1].

Следует отметить, что выражения (4) и (5) действительны при: $t \geq 800$ °С и содержании хрома не более 3%.

Расчёт удельного давления металла на валки можно выполнить, воспользовавшись выражением, предложенным Ш. Гелеи [2]:

$$p_{cp} = k_f \left(1 + C_g \cdot \mu \cdot \frac{l}{h} \sqrt[n]{v} \right), \quad (6)$$

где $k_f = 0,015(1400 - t)$, кГ/мм^2 – сопротивление линейной деформации; $l = \sqrt{r\Delta h}$ – длина дуги захвата; n – показатель степени, принимаемый равным четырем; C_g – опытный коэффициент, зависящий от отношения длины дуги l к величине раствора валков h_1 и определяемый по кривой, приведенной на рис. 1.

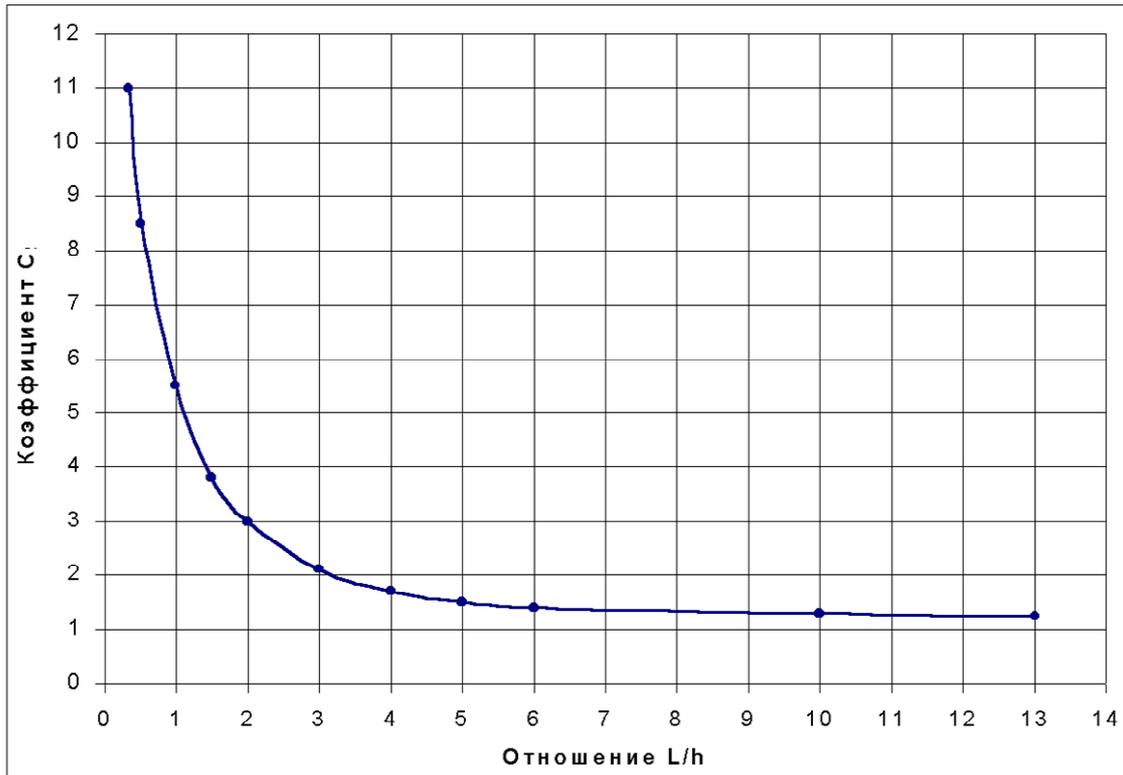


Рис. 1. Зависимость коэффициента C_g от отношения длины дуги захвата к раствору валков

Выражение Гелеи также ограничено теми характеристиками эмпирических условий, в которых оно было получено, а именно $t > 700^\circ\text{C}$ и $v < 5$ м/с.

Полученную Симсом теоретическую зависимость [2] применяют при значительном отношении ширины прокатываемой полосы к средней ее толщине ($b/h_{cp} > 4$):

$$\frac{p_{cp}}{2k} = \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \sqrt{\frac{r}{h_1}} \ln \frac{h_H}{h_1} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \sqrt{\frac{r}{h_1}} \ln \frac{1}{1-\varepsilon} \right], \quad (7)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$ – относительное обжатие; $h_n = h_1 + 2r(1 - \cos(\gamma))$ – толщина металла

на границе зоны прилипания и зоны проскальзывания [1], которая соответствует углу γ . На величину последнего оказывают влияние материал поверхности валков, состав металла и его температура. Учет влияния границы зон прилипания и проскальзывания важен для больших обжатий, для $\gamma \leq 0,1$ радиана можно принимать $h_n = (h_1 + h_0)/2$.

Все рассмотренные модели могут быть применены для представления процесса непрерывной прокатки при температурах $1000 \div 1300^\circ \text{C}$ в станах черновой обработки, таких как блюминги и слябинги, работающие на скоростях прокатки $v < 5$ м/с.

Цель работы.

Выполнив анализ математических моделей, определяющих силовые параметры при обработке металла давлением, следует выбрать из них наиболее оптимальную по точности. Это позволит построить автоматизированную систему стабилизации технологических параметров при обработке металла давлением с учетом влияния момента прокатки. Актуальной является также задача определения пределов применимости и математической адекватности выбранной модели в сравнении с результатами непосредственных измерений физических величин на действующем прокатном стане.

Изложение основного материала

Нелинейная зависимость (рис. 1) может быть выражена аналитически с помощью регрессионной модели степенного вида $C_g = a \cdot (l/h)^b + c$ [3]. Для построения такой модели был применен метод наименьших квадратов. В результате регрессионного анализа с коэффициентом смешанной корреляции $R^2 = 0,994$ была получена зависимость аналитического вида

$$C_g = 4,9892 \cdot (l/h)^{-0,7214} + 0,1399. \quad (8)$$

Использование выражения (8) не совсем удобно при моделировании работы прокатного стана, поэтому была предложена модель вида

$$C_g = 5 \cdot (l/h_1)^{-0,667} = 5 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{h_1}{l}\right)^2} = 5 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_1^2}{r\Delta h}}. \quad (9)$$

Рассчитанный для такой модели коэффициентом корреляции $R^2 = 0,984$ позволяет утверждать адекватность описания (9) зависимости на рис. 1 с ошибкой, не превышающей $\pm(1 - R) = 0,008 = 0,8\%$.

Каждая из моделей, описываемых выражениями (1), (6) и (7), была реализована в виде m-файла-функции в среде MATLAB, где с ее использованием было проведено моделирование 15-ти последовательных проходов прокатки заго-

товки прямоугольного сечения блюмингом 1150 Днепродзержинского металлургического комбината. Исходными данными для моделирования были размеры валков r , их материал, а также параметры прокатки для каждого прохода: температура металла t , скорость валков v , начальная толщина металла h_0 , обжатие Δh .

Для моделирования использовалась величина удельного давления на единицу поверхности валка p_{cp} по каждой из трех моделей. Для оценки и проверки адекватности моделей, а также выбора наиболее рациональной модели, полученные результаты моделирования сравнивались с непосредственными измерениями удельного давления, полученными инженерами ДМК в результате опыта (таблица).

Результаты моделирования работы блюминга 1150 по моделям Экелунда(1), Гелеи(7) и Симса(9)

№ прохода	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	t , °С	v , м/с	Удельное давление p_{cp} , кг/мм ²			
						Экспериментальное	По модели (1)	По модели (6)	По модели (7)
1	690	642	48	1180	1,38	11	10,118	7,446	11,46
2	642	597	45	1175	2,11	13,1	9,922	7,677	12,05
3	700	630	70	1170	1,33	9,4	8,644	8,109	8,61
4	630	567	63	1165	1,83	12,2	8,905	8,434	9,27
5	567	527	40	1160	2,48	15,1	11,1	8,302	13,61
6	527	487	40	1155	2,25	16,2	11,774	8,704	13,54
7	487	463	24	1150	2,25	19,6	16,549	8,608	20,73
8	463	447	16	1145	2,33	27,5	21,666	8,537	28,87
9	630	574	56	1140	2,23	12,4	10,444	9,338	11,41
10	574	514	60	1135	2,07	11,6	10,502	9,849	10,52
11	514	458	56	1130	2,17	10,3	11,103	10,217	10,92
12	458	405	53	1125	2,17	12,1	11,783	10,647	11,15
13	485	378	107	1120	2,17	7,3	7,857	11,614	5,68
14	378	305	73	1110	2,12	9,9	10,528	12,306	7,82
15	430	322	108	1100	2,52	9,2	8,208	12,892	5,58

Для наглядности проиллюстрируем полученные результаты с помощью зависимостей удельного давления от номера прохода (рис. 2). Для оценки адекватности моделей был выполнен регрессионный анализ, в ходе которого ошибки каждой из моделей были проверены на соответствие нормальному закону распределения, а методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты регрессии [3].

При проверке на соответствие данных нормальному закону распределения был получен положительный результат для ошибок всех трех моделей. Коэффициенты корреляции между полученными в результате моделирования и экспериментальными данными для моделей следующие: Экелунда $R^2 = 0,8999$; Гелеи $R^2 = 0,1916$; Симса $R^2 = 0,9544$.

В дальнейшем при моделировании процессов непрерывной горячей прокатки стали считаем рациональным использование модели Симса, как наиболее адекватно описывающей данный процесс. При невыполнении условия применимости модели Симса $b/h_{cp} > 4$, воспользуемся моделью Экелунда, также показывающей удовлетворительный результат.

Выводы

В работе проанализирован ряд математических моделей прокатки черных металлов и составлены соответствующие им имитационные модели. Для модели Гелеи была получена с высокой степенью точности аналитическая зависимость коэффициента C_g от отношения длины дуги захвата к раствору валков. Результаты работы каждой из имитационных моделей оценены по методу наименьших квадратов и коэффициенту корреляции в сравнении с эксперимен-

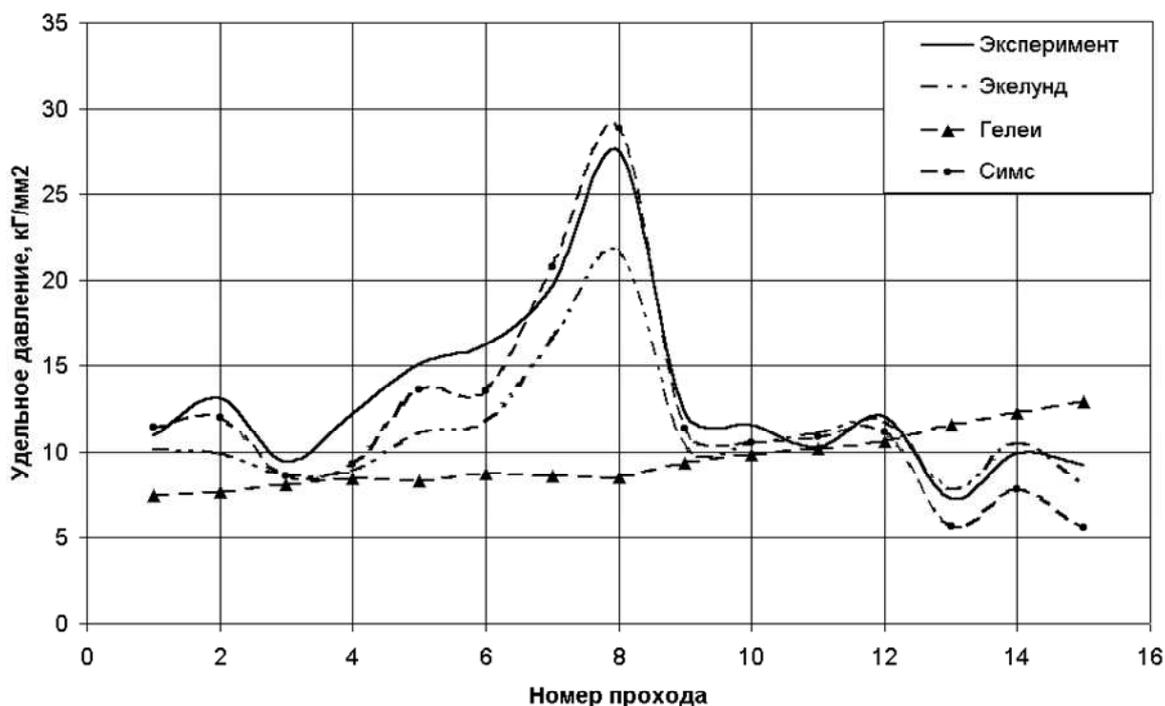


Рис. 2. Кривые сравнения результатов моделирования прокатки на блюминге 1150 в сравнении с экспериментальными данными

тальными данными. Наиболее адекватно описывает процесс прокатки в условиях температуры металла свыше 1000°C и скорости прокати до 5 м/с модель Симса. В случае ее неприменимости по геометрии раската при $t \geq 800^{\circ}\text{C}$ и содержании в стали хрома до 3% рекомендуется использовать модель Экелунда.

Список литературы

1. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных цехов. – М.: Металлургия, 1965. – 516 с.
2. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
3. Левин Дэвид М. Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 1312 с.