

УДК 621.771

Румянцев М.И., Завалищин А.Н.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ЛИНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Аннотация. Разработана модель изменения температуры полос из углеродистой и низколегированной стали в линии широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП). С целью повышения точности прогнозирования температуры металла на контрольных участках модель составлена из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса. Качество модели оценивали для случайно выбранных вариантов из массива данных о прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК». При этом, наряду с абсолютными отклонениями и относительными погрешностями, применили показатель «действенность модели». Погрешность прогноза температуры конца прокатки в черновой группе составила от -2,1 до +3,0 %, что означает абсолютные отклонения от -23 до +31 °С. По температуре конца прокатки в чистовой группе качество модели характеризуется относительной ошибкой от -4,8 до +9,1 % и единичными абсолютными отклонениями от -40 до +80 °С. В то же время оценка действенности модели показала, что 82,2 % расчетных значений температуры конца черновой прокатки и 84,9 % расчетных значений температуры конца чистовой прокатки находятся в диапазоне ± 20 °С относительно фактических значений.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, углеродистая сталь, низколегированная сталь, температура металла, математическая модель, погрешность модели, действенность модели.

Введение

Прогнозирование температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) имеет важное значение как для разработки новых, так и для совершенствования действующих режимов прокатки, а также при выборе начальной настройки стана в АСУ ТП [1]. Поэтому изучению и моделированию изменения температуры листового металла при горячей прокатке уже давно уделяют много внимания как отечественные, так и зарубежные исследователи [2–11]. Изучаются и уточняются закономерности отдельных явлений, создаются комплексные модели.

Некоторые из таких моделей базируются на статистическом анализе результатов экспериментов и применимы лишь для тех условий, в которых построены соответствующие зависимости. Другие содержат аналитические выражения, полученные при определенных допущениях, которые могут не в полной мере соответствовать особенностям реального процесса прокатки на станах с различным составом оборудования. Вместе с тем очевидна потребность в получении моделей достаточной точности, что при проектировании технологий прокатки и настройке стана будет способствовать обеспечению заданных структуры и механических свойств проката.

Ранее [12] было установлено, что точность прогнозирования температуры металла на контрольных участках в линии ШСГП может быть повышена за счет применения модели, составленной из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса. Известен положительный опыт построения и применения таких моделей для случаев прокатки тонких полос из малоуглеродистой [12] и толстых полос из низколегированной [13] стали. В данной статье представлены результаты разработки модели изменения в линии

ШСГП температуры полос и нелегированной, и низколегированной стали.

Методика исследования

Чтобы создать модель изменения в линии ШСГП температуры и нелегированной, и низколегированной стали, как и в работах [13, 14], изучали прокатку полос толщиной 1,5 – 2,0 мм из сталей 006/IF, 08пс, 08Ю, SAE 1006, СтЗпс, SPCC, SPCE и толщиной 4,6 – 16 мм из сталей марок X42(M), 09ГСФ, 10Г2ФБ, 12ГСБ, 13Г1С–У, 17Г1С–У (всего 1001 наблюдение). Рассматривали следующую схему изменения температуры металла. До входа в очаг деформации температура начала охлаждения $t_{но}$ снижается в результате излучения Δt_r и конвективного теплообмена с окружающим воздухом Δt_e , водой Δt_w либо в гидросбиве ($\Delta t'_w$), либо от воды на участках межклетевого охлаждения ($\Delta t''_w$). В очаге деформации происходит охлаждение за счет теплопередачи рабочим валкам Δt_R и разогрев в результате пластического деформирования Δt_η . Таким образом:

$$t_{кн} = t_{но} - \Delta t_r - \Delta t_e - \Delta t_w - \Delta t_R + \Delta t_\eta. \quad (1)$$

Составляющие, отображающие снижение температуры под воздействием воды во всех случаях рассчитывали по формулам [15]:

$$\Delta t'_w = 0,185 \frac{(t_0 - 20) n_k}{v_n h}; \quad (2)$$

$$\Delta t''_w = \frac{V_{\Sigma w}}{0,212 v_n h b_{\max}}, \quad (3)$$

где h – толщина охлаждаемой полосы, мм; v_n – скорость полосы, м/с; n_k – число включенных коллекто-

ров гидросбыва; $b_{\max}$ – максимальная ширина, прокатываемая на стане, м; $V_{\Sigma w}$ – расход воды на межклеточное охлаждение, м³/ч.

Для расчета остальных составляющих изменения температуры рассмотрели 33 зависимости, описанные в работе [15]. Исходя из особенностей физики процессов, с учетом ранее выполненных исследований [12–14], в качестве существенных факторов выбрали следующие: для изменений температуры излучением и конвекцией – отношение времени охлаждения к толщине полосы (τ/h), при контакте с рабочими валками – произведение скорости и толщины полосы на выходе из очага ($v_n h_1$), для разогрева в результате пластической деформации – среднее контактное давление p_{cp} .

В отличие от ранее выполненного исследования для определения интервалов аккомодации по каждому из факторов применили метод, аналогичный методу построения интервального вариационного ряда. Соответствующий фактору X_j диапазон его варьирования $\{X_{j.\min}; X_{j.\max}\}$ разбивали на интервалы длиной $\Delta_j = (x_{j.\max} - x_{j.\min}) / (k - 1)$, где $k = 1 + 3,322 \lg(n)$ – число интервалов; n – число наблюдений. Для каждой составляющей температурного баланса Δt_{γ} (γ есть вид воздействия на металл, вызывающий изменение его температуры – т.е. конвекция воздуха, излучение в окружающую среду, теплопередача валкам и деформационный разогрев) в каждом наблюдении ($i = 1, \dots, n$) расчетами по нескольким формулам ($\varphi = 1, \dots, m$) получали выборки $\{\Delta t_{\gamma \varphi i}\}_m$ и находили среднее значение $\bar{\Delta t}_{\gamma i} = (1/m) \sum_{\varphi=1}^m \Delta t_{\gamma \varphi i}$. Предпочтительной формулой для расчета Δt_{γ} в i -м наблюдении считали ту, результат применения которой отвечает условию $|\Delta t_{\gamma \varphi i} - \bar{\Delta t}_{\gamma i}| \rightarrow \min$. Для интервала Δ_j предпочтительной считали формулу, которая в данном интервале обеспечивала указанное условие наиболее часто.

Результаты исследования

Применительно к изменению температуры излучением в случаях, когда значения фактора τ_{re}/h не превышают 0,3 с/мм, лучший результат показала формула Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича, которая в работе [15] имеет обозначение (II.20). При рекомендуемом авторами значении приведенного коэффициента излучения $C = 4,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_r = \frac{8,74}{\rho c} \left(\frac{t_{0re} + 273}{100} \right)^4 \frac{\tau_{re}}{h}, \quad (4)$$

где ρ – плотность стали, кг/м³; c – теплоемкость, кДж/(кг·К); t_{0re} – температура начала охлаждения на воздухе, °С; τ_{re} – продолжительность охлаждения на воздухе, с; h – толщина полосы, мм.

В диапазоне значений $0,3 < \tau_{re}/h \leq 1,3$ с/мм предпочтительно применять формулу А. Лаваяля и Г. Кройлича [15, II.18]. При указанного выше значении C , а также с учетом того, что время должно быть выражено в часах, а толщина в метрах, формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_r = (t_{0re} + 273) - \sqrt[3]{\frac{\rho c h \cdot 10^{-3}}{0,0276 \cdot 10^{-8} \tau_{re} + \frac{c \rho h \cdot 10^{-3}}{(t_{0re} + 273)^3}}}. \quad (5)$$

При $\tau_{re}/h > 1,3$ с/мм лучшие результаты обнаружил формула В.А. Тягунова [15, II.8] (отношение 1/600 заменено его значением с точностью до 4 знака)

$$\Delta t_r = 0,0017 \left(\frac{t_{0re} + 273}{100} \right)^4 \frac{\tau_{re}}{h}. \quad (6)$$

Снижение температуры полосы при ее контакте с валками в случае $v_n h_1 \leq 0,44 \text{ м}^2/\text{с}$ лучше отображает формула Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, II.54]. С учетом того, что $\arccos[1 - (h_0 - h_1)/(2R)]$ есть угол захвата α , формулу представляем в следующем виде:

$$\Delta t_R = 1,83 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{R\alpha}}{h_0 + h_1} (t_{0n} - 60) \sqrt{\frac{1-s}{v_n}}, \quad (7)$$

где s – опережение; R – радиус вала, мм; v_n – скорость прокатки, м/с.

Если $v_n h_1 > 0,44 \text{ м}^2/\text{с}$, предпочтительной является формула Ш. Гелеи [15, II.49]

$$\Delta t_R = 4(t_{0n} - t_R) \frac{\alpha_R}{\rho c} \frac{\tau_R}{(h_0 + h_1) \cdot 10^{-3}}, \quad (8)$$

где t_{0n} и t_R – температура металла в сечении входа в очаг деформации и рабочего вала, °С; $\alpha_R = (6-12) \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплоотдачи (значение принималось в указанных пределах как случайное число); τ_R – время контакта точки вала с полосой, с. В соответствии с [15] значение c должно быть выражено в Дж/кг·К.

Для прогнозирования снижения температуры полосы в результате конвективного теплообмена с воздухом во всем диапазоне фактора τ_{re}/h (от 0,058 до 2,221 с/мм) в качестве предпочтительной прояви-

Теория и технология металлургического производства

лась формула Н.Н. Крейдлина [15, П.41]. В оригинале записи данной формулы первым сомножителем стоит число 2, а время должно быть выражено в часах. Тогда получим $2/3600=5,55 \cdot 10^{-4}$, и формула принимает следующий вид:

$$\Delta t_e = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{A}{c_p} \sqrt[3]{(t_{0re} - t_e)^4} \frac{\tau_{re}}{h \cdot 10^{-3}}, \quad (9)$$

где A – эмпирический коэффициент. На основании [15, рис. 73] получили парную аппроксимацию $A = 2,5993 - 0,305 \ln[(t_{0re} + t_e)/2]$ ($R^2=0,998$).

Во всем диапазоне значений среднего контактного давления (45-800 МПа) деформационный разогрев рекомендуется определять по формуле В.И. Зюзина, М.Я. Бровмана и А.Ф. Мельникова [15, П.97]

$$\Delta t_{\eta} = 0,502 p_{cp} \lg(h_0/h_1), \quad (10)$$

Для расчета теплоемкости и плотности при различной температуре на основании данных работы [16] построили линейные кусочные аппроксимации

$$c(\rho) = b_0 + b_1 \cdot t/1000. \quad (11)$$

Коэффициенты аппроксимации (11) для теплоемкости представлены в табл. 1, а для плотности – в табл. 2. При этом использованы следующие условные обозначения типов стали: МУ – малоуглеродистая; СУ – среднеуглеродистая; НЛ – низколегированная.

Оценивание качества модели

Качество модели оценивали для 220 случайно выбранных вариантов из массива данных о прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК» 4080 полос из углеродистых и 4030 полос из низколегированных марок стали. При прокатке углеродистых марок температура конца черновой прокатки наблюдалась, в основном, в пределах 1040-1100°C (рис. 1, а), а конца чистовой – преимуще-

ственно в диапазоне от 830 до 920°C (рис. 1, б). Черновая прокатка низколегированных марок завершалась, в основном, при температуре 1040-1090°C (рис. 1, в), а чистовая – в диапазоне от 760 до 860°C (рис. 1, г).

При тестировании модели актуальные значения параметров, которые трудно идентифицировать, принимали как случайные значения из известных интервалов их варьирования: $x = \bar{x} + s \cdot Rnd(-3;3)$, где $\bar{x}$ и s – среднее выборочное и выборочное стандартное отклонение параметра X . Например, известно, что температура технической воды находится в пределах от 15 до 35 °C. В таком случае $\bar{x} \approx (15+35)/2=20$ °C; $s \approx (35-15)/4=5$ °C и $t_w = 20 + 5 \cdot Rnd(-3;3)$.

Для температуры нагрева сляба в интервале от 1170 до 1280°C выборочное стандартное отклонение фактической температуры от номинального значения $s = 0,0173 t_{cl}^\circ - 15,5$ °C. Следовательно,

$$t_{cl} = t_{cl}^\circ + (0,0173 t_{cl}^\circ - 15,5) Rnd(-3;3).$$

На промежуточном рольганге ШСГП 2000 ПАО «ММК» установлена система теплозащитных экранов «Enkorpanel», разработанная фирмой Davy McKee, которая применяется при прокатке относительно тонких полос. Для экранированного участка характерна скорость охлаждения 0,3-0,7 °C/c [17]. В таком случае $\bar{x} = 0,5$ °C/c и $s \approx 0,03$ °C/c, а снижение температуры на экранированном участке длиной L_{EN} при скорости транспортирования v_{mp} составит $\Delta t_{EN} = [0,5 + 0,03 Rnd(-3;3)] \cdot L_{EN}/v_{mp}$.

Характеристики вариации температуры рабочих валков приведены в табл. 3.

Диаграммы соответствия прогнозируемых значений температуры конца черновой ($t_{кнR}$) и чистовой ($t_{кнF}$) прокатки представлены на рис. 2.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимаций зависимости теплоемкости от температуры, кДж/кг·К

Тип стали	Температура, °C											
	не более 700		701-750		751-800		801-900		900-1000		свыше 1000	
	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1
МУ	0,27	0,83	-2,67	5,05	4,71	-4,79	1,46	-0,73	2,01	-1,34	0,66	0,01
СУ	0,31	0,74	-9,51	14,76	14,52	-17,3	1,37	-0,84	0,48	0,16	0,48	0,16
НЛ	0,28	0,80	-7,72	12,22	12,90	-15,3	1,70	-1,26	0,35	0,24	0,35	0,24

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимаций зависимости плотности от температуры, кг/м³

Тип стали	Температура, °C											
	не более 700		701-750		751-800		801-900		900-1000		свыше 1000	
	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0	b_1
МУ	7,89	-0,39	7,88	-0,37	7,78	-0,24	7,53	-0,08	8,06	-0,52	8,07	-0,52
СУ	7,89	-0,39	7,52	0,14	7,51	0,15	7,91	-0,35	8,06	-0,52	8,06	-0,52
НЛ	7,88	-0,39	7,34	0,38	7,59	0,04	7,91	-0,36	8,06	-0,53	8,06	-0,53

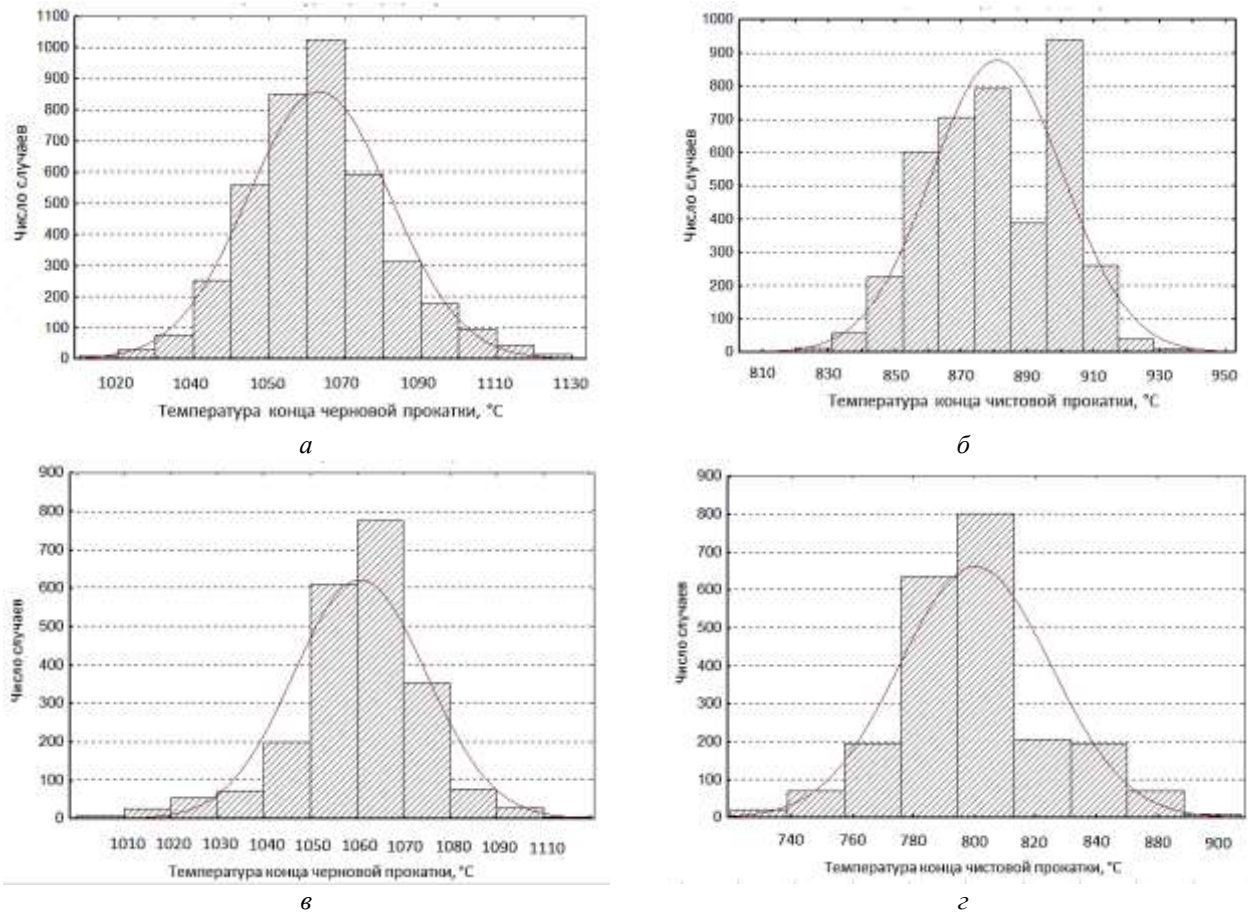


Рис. 1. Вариация температуры конца черновой и чистовой прокатки для углеродистых (а-б) и низколегированных (в-г) марок стали на ШСГП 2000 ОАО «ММК»

Таблица 3

Характеристики вариации температуры рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки

$t_R, ^\circ\text{C}$	Клетки черновой группы						Клетки чистовой группы						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
$\bar{x}$	79	75	71	66	60	57	81	81	76	75	70	70	66
s	0,7	0,8	1,0	0,8	0,7	0,7	0,83	0,83	0,83	0,67	0,83	0,83	0,83

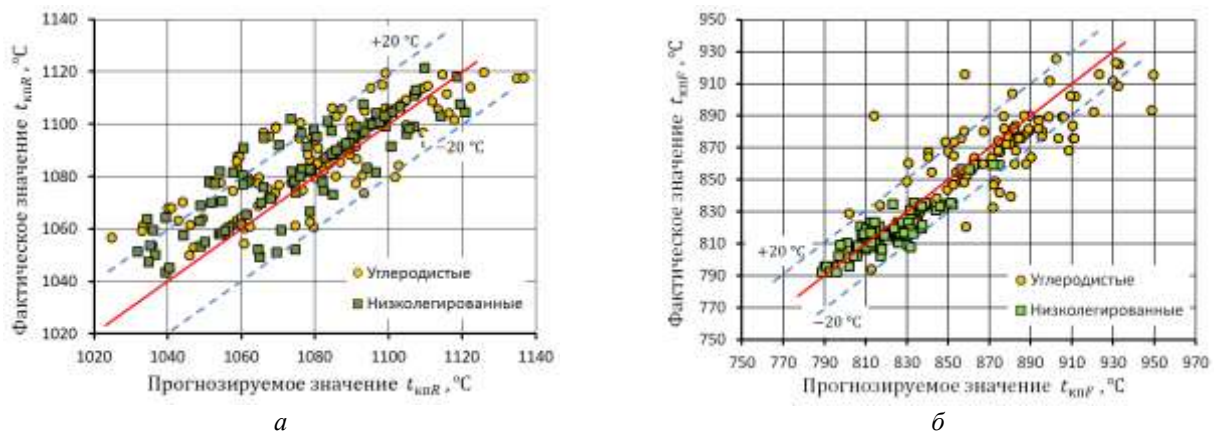


Рис. 2. Диаграммы соответствия прогнозируемых и фактических значений температуры конца черновой (а) и чистовой (б) прокатки на ШСГП

Погрешность прогноза t_{knR} (рис. 2, а) составила от -2,1 до +3,0 %. Однако в области температур 1030-1120 °С такая, относительно малая, погрешность означает абсолютные отклонения от -23 до +31 °С. Рассмотрели также характеристику «действенность модели»: $E_\delta = 100 \cdot m_\delta / n$ (%), где n – число испытаний модели; m_δ – число прогнозируемых значений моделируемого параметра, которые отличаются от фактических значений не более чем на величину δ [18]. При $\delta = \pm 20$ °С действенность модели составила 82,2 %. Это означает, что в 82,2 % случаев обеспечивается условие $t_{knR} \leq |\pm 20|$ °С.

По температуре конца чистовой прокатки качество модели характеризуется относительной ошибкой от -4,8 до +9,1 % и единичными абсолютными отклонениями от -40 до +80 °С (рис. 2, б). При этом действенность модели по условию $t_{knF} \leq |\pm 20|$ °С составляет 84,9 %.

Заключение

Необходимая точность прогнозирования температуры металла на контрольных участках в линии ШСГП может быть обеспечена за счет применения модели, составленной из известных формул, которые выбираются в зависимости от значений существенных факторов процесса.

Для излучения и конвекции при охлаждении на воздухе существенным фактором является отношение времени охлаждения к толщине полосы τ_{re}/h . Снижение температуры излучением рекомендуется определять по формулам Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, II.20] ($\tau_{re}/h < 0,3$ с/мм), А. Лавайля и Г. Кройлича [15, II.18] ($0,3 < \tau_{re}/h \leq 1,3$ с/мм), а также В.А. Тягунова [15, II.8] ($\tau_{re}/h > 1,3$ с/мм). Снижение температуры полосы в результате конвективного теплообмена с воздухом во всем диапазоне фактора τ_{re}/h (от 0,058 до 2,221 с/мм) оценивается формулой Н.Н. Крейдлина [15, II.41].

Для охлаждения полосы в результате контакта с рабочими валками существенным фактором является секундный объем металла $v_n h_1$. При $v_n h_1 \leq 0,44$ м²/с рекомендуется использовать формулу Ю.Д. Железнова и Б.А. Цифриновича [15, II.54]. Если $v_n h_1 > 0,44$ м²/с, предпочтительной является формула Ш. Гелеи [15, II.49].

Для деформационного разогрева существенным фактором является среднее контактное давление. В диапазоне значений среднего контактного давления 45-800 МПа деформационный разогрев рекомендуется определять по формуле В.И. Зюзина, М.Я. Бровмана и А.Ф. Мельникова [15, II.97].

Оценка действенности разработанной модели показала, что 82,2 % расчетных значения температуры конца черновой прокатки и 84,9 % расчетных значений температуры конца чистовой прокатки нахо-

дятся в диапазоне ± 20 °С относительно фактических значений.

Список литературы

1. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Автоматизация процесса горячей прокатки плоского металла. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 256 с.
2. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1974. 175 с.
3. Kiuchi M. (I), Yanagimoto J., Wakamatsu E. Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2000. 49(1). Pp. 209-212. <https://www.researchgate.net/publication/239376029>
4. Kim J., Lee J., Hwang S. M. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling // International journal of heat mass transfer. 2009. № 52. Pp. 1864-1874. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931008005966>
5. Analysis of Temperature loss of Hot Metal during Hot Rolling Process at Steel Plant / Kirthan K. K. A., Mourian S. S., Vignesh M., Nisanth A. // International Journal of Modern Engineering Research. Vol. 4. Iss.8. Aug. 2014. Pp. 23 – 29. <https://www.academia.edu/15843488>
6. Анализ и экспериментальная верификация модели тепловыделения при фазовых превращениях / А.Р. Гареев, С.А. Муриков, С.И. Платов и др. // Производство проката. 2015. № 2. С. 30 – 34.
7. Velay V., Michrafy A. An analytical model for the prediction of hot roll temperatures in a hot rolling process // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2016. 47(12). P. 1202-1215. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01609107/document>
8. Heat Transfer Technology for Steel Rolling Process / Serizawa Y., Yamamoto R., Takamachi Y. and others // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. No. 111. March 2016. Pp. 92 – 100. <http://nssmc.com/en/tech/report/nssmc/pdf/111-14.pdf>
9. Математическая модель для расчета температуры полосы при горячей прокатке на стане 2000 ПАО «Северсталь» / С. Ф. Соколов, А. А. Огольцов, Д. Ф. Соколов, А. А. Васильев // Сталь. 2017. № 2. С. 35-41.
10. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in «Deform 3D» / A.G. Levykina, A.A. Chabonenko, V.V. Shkatov, I.P. Mazur // FNM 2018. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1134 (2018) 012034. 8 p. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1134/1/012034>
11. Кухарь В.В., Курпе А.Г. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки // Обработка материалов давлением. 2018. № 1 (46). С. 159-166. [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd1\(46\)_2018/article/26.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd1(46)_2018/article/26.pdf)
12. К вопросу построения модели для расчета составляющих температурного режима металла в линии

- широкополосного стана горячей прокатки / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, Д.Ю. Загузов, О.С. Носенко // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. С. 26 - 34.
13. Синтез модели для расчета температуры тонких полос из малоуглеродистых сталей в линии широкополосного стана горячей прокатки / Р.А. Исмагилов, М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, и др. // Производство проката. 2007. № 5. С. 5-9.
 14. Моделирование изменения температуры металла при горячей прокатке толстых полос из низколегированных сталей на широкополосных станах с целью повышения результативности процесса / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, О.Ю. Сергеева и др. // Производство проката. 2009. № 9. С. 7-11.
 15. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
 16. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / под ред. Б.Е. Неймарк. М.; Л.: Энергия, 1967. 240 с.
 17. Стариков А.И. Современный листопрокатный комплекс для производства листовой стали высокого качества. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1996. 128 с.
 18. Rumyantsev M. I., Tulupov O. N. Further developments in simulation of metal forming processes // CIS Iron and Steel Review. Vol. 16 (2018). Pp. 21-24.

Сведения об авторах

Румянцев Михаил Игоревич – профессор кафедры технологий обработки материалов, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mir@magtu.ru.

Завалишин Александр Николаевич – профессор кафедры литейного производства и материаловедения, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaval1313@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR STRIP TEMPERATURE CHANGE PREDICTION IN THE HOT STRIP ROLLING MILL

Mikhail I. Rumyantsev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mir@magtu.ru.

Aleksandr N. Zavalishchin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaval1313@mail.ru.

Abstracts. A model of temperature change of strips made of carbon and low-alloy steel in the line of hot-rolling strip mill (HSRM) has been developed. In order to improve the accuracy of metal temperature forecasting at the control sites, the model is made up of known equations, which are selected depending on the values of significant factors of the process. The quality of the model was assessed for randomly selected variants from the practical data set at HSRM 2000 of Magnitogorsk Iron and Steel Works. At that, along with absolute deviations and relative errors, the indicator "model effectiveness" was applied. The relative error of the prediction of the end-rolling temperature in the roughing stands ranged from -2.1 to +3.0 %, which means absolute deviations from -23 to +31 °C. The relative error of the prediction of the end-rolling temperature in the finishing stands ranged from -4.8 to +9.1 %, which means absolute deviations from -40 to +80 °C. At the same time, an model effectiveness evaluation showed that 82.2% of the predicted end-rolling temperature in the roughing stands and 84.9% of the predicted end-rolling temperature in the finishing stands are in the ± 20 °C range relative to the actual values.

Keywords: hot strip rolling mill, carbon steel, low-alloy steel, metal temperature, mathematical model, model error, model effectiveness

Ссылка на статью:

Румянцев М.И., Завалишин А.Н. Развитие модели прогноза температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1 (32). С. 41-46.

Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. Improvement of the mathematical model for strip temperature change prediction in the hot strip rolling mill. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp.41-46.