

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО И ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС НА ОТВОДЯЩЕМ РОЛЬГАНГЕ ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

MATHEMATICAL MODELING FOR FORMING THE THERMAL AND PHASE STATES OF STEEL STRIPS ON THE COLLECTING ROLLER TABLE DURING THIN-SHEET HOT ROLLING

Ю.А. Мухин¹, С.М. Бельский², Е.В.Макаров, А.О. Стоякин

¹ ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»,

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

prokatka@stu.lipetsk.ru

Abstract

The article presents a mathematical model for accelerated cooling of strips on the collecting roller table of the continuous wide-strip hot-rolling mill taking into account the changes in steel's phase state and thermal capacity in polymorphic transformation.

Механические свойства полос, прокатываемых на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП), зависят от различных параметров, из которых наиболее влияющими являются температура и скорость охлаждения полос на отводящем рольганге. В процессе ускоренного охлаждения полос контролируемые параметрами являются температура конца прокатки $T_{\tilde{e}i}$, температура смотки $T_{\tilde{n}i}$, скорость прокатки $V_{i\delta}$, а также температура и расход охлаждающей воды. Скорость охлаждения полос на отводящем рольганге контролируется опосредованно. Кроме того, на процесс охлаждения оказывает влияние конструкция отводящего рольганга и установки ускоренного охлаждения (УУО). Управляющим воздействием является число включенных коллекторов и номер первого включенного коллектора УУО.

Для разработки режимов горячей прокатки полос с заданными механическими свойствами необходимы математические модели, с помощью которых рассчитываются необходимые температурно-скоростные параметры процесса ускоренного охлаждения прокатываемых полос на отводящем рольганге.

Разработка математических моделей ускоренного охлаждения полос на отводящем рольганге осложняется тем, что теплоемкость феррита (α -фаза) и аустенита (γ -фаза) зависит от температуры, а при температурах, близких к температуре фазового превращения эта зависимость существенно нелинейная.

Большинство математических моделей теплового состояния полосы на отводящем рольганге не учитывает теплоту полиморфного превращения, что может приводить к существенной ошибке прогноза температуры смотки.

На кафедре прокатки ЛГТУ разработана математическая модель процесса ускоренного охлаждения полос с учетом выделения тепла при поли-

морфном превращении и влияния температуры на теплофизические свойства охлаждаемого металла.

Математическая модель теплового состояния горячекатаной полосы на отводящем рольганге НШСГП основана на численном решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности (1) методом конечных разностей:

$$\rho(T) \cdot c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, $кг/м^3$; c – удельная теплоемкость металла $Дж/(м \cdot К)$; λ – теплопроводность металла, $Вт/(м \cdot К)$; T – температура металла, $К$; τ – время, $с$; x – координата по толщине полосы, $м$; q_v – удельная мощность тепловых источников, которые моделируют выделение тепла при полиморфном превращении, $Вт/м^3$.

Потери тепла полосой в результате охлаждения водой, излучения и взаимодействия с окружающим воздухом описываются граничными условиями второго и третьего рода и для разностной схемы задаются в следующем виде:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q + \alpha(T - T_{cp}), \quad (2)$$

где T_{cp} – температура среды, $К$; q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$; α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$.

Вычисление величин теплового потока и коэффициента теплоотдачи производится по зависимостям, представленным в работах [1-2] для условий отводящего рольганга НШСГП.

При охлаждении полосы на отводящем рольганге НШСГП сталь претерпевает полиморфное $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение, которое сопровождается значительным выделением тепла, а теплоемкость образовавшейся α – фазы (феррит) почти в 2 раз выше, чем γ – фазы (аустенит).

На рисунке 1 представлена диаграмма удельной теплоемкости α -фазы и γ -фазы при

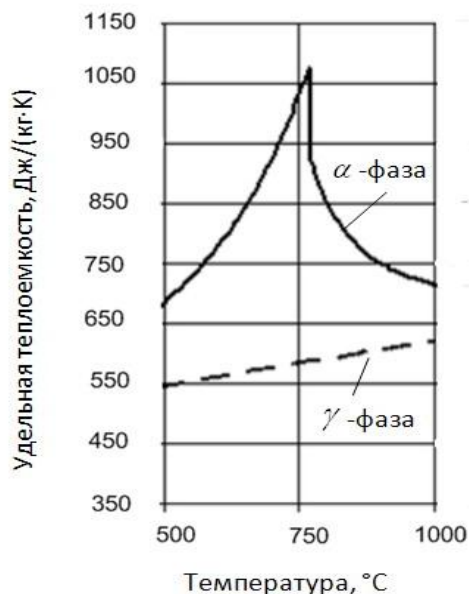


Рис. 1 – Истинная теплоемкость чистого железа

Для расчета теплового эффекта полиморфного превращения на отводящем рольганге необходимо знать температуры начала превращения Ar_3 и окончания превращения Ar_1 . Величины этих температур зависят от химического состава стали, скорости охлаждения, плотности дислокаций в кристаллической решетке, размера зерна и предшествующей скорости деформации металла.

При разработке математической модели величины критических точек Ar_3 и Ar_1 рассчитывались в зависимости от химического состава стали и скорости охлаждения. Размер зерна учитывался косвенно путем выбора термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита с температурами аустенизации, близкими к условиям тонколистовой горячей прокатки на НШСГП.

Величины плотности и теплопроводности стали являются справочными данными. Удельная теплоемкость стали рассчитывается по формуле:

$$c = X \cdot c_{\alpha} + (1 - X)c_{\gamma}, \quad (3)$$

где X – доля образовавшейся α -фазы; c_{α} – теплоемкость α -фазы; c_{γ} – теплоемкость γ -фазы.

Величина X рассчитывается по формуле, приведенной в работе [4]:

$$X = 1 - \exp(-by^n), \quad (4)$$

где $y = \frac{Ar_3 - t^j}{Ar_3 - Ar_1}$; $b = -0,009Ar_3 + 14,521$;

$n = 0,018Ar_3 - 9,293$; t^j – температура металла

температурах тонколистовой горячей прокатки [3].

на отводящем рольганге в j -й момент времени, °С; Ar_3 и Ar_1 – критические точки, °С.

Температуры Ar_3 и Ar_1 можно описать уравнением вида [5]:

$$Ar_i = kW - mW^n + A_i; \quad i = 1,3; \quad (5)$$

$$W = \frac{t_{масс}^{kn} - t_{масс}^j}{\tau_{mp}^j},$$

где W – скорость охлаждения, °С/с; A_i – изотермическое значение с учетом химического состава; k, m, n – коэффициенты; $t_{масс}^{kn}$ – среднемассовая температура конца прокатки, °С; $t_{масс}^j$ – среднемассовая температура полосы в j -й момент времени, τ_{mp}^j – время транспортирования расчетного сечения в j -й момент времени от пирометра конца прокатки, с.

В ходе анализа фазовых диаграмм [6–7] получены уравнения регрессии для температур A_3 и A_1 .

Уравнение регрессии для расчета температуры A_3 для сталей с массовым содержанием $0 < [C] \leq 0,3\%$, $[Mn] \leq 2\%$, $[Si] \leq 1\%$ и содержанием других химических элементов не более 0,05% имеет следующий вид:

$$A_3 = 911 - 459,7[C] + 394,8[C]^2 - 43,5[Mn] + 125,9[Mn][C] - 170[Mn][C]^2 + 80,8[Si] - 216,6[Si][C] + 321,6[Si][C]^2 - 27,4[Mn][Si] + 4,85[Mn]^2[Si] + 3,07[Mn][Si]^2 \quad (6)$$

Уравнения регрессии для расчета температуры A_1 для сталей с массовым содержанием $0,004\% < [C] \leq 0,3\%$, $1\% < [Mn] \leq 2\%$, $[Si] \leq 1\%$ и содержанием других химических элементов не более 0,05% имеют следующий вид:

$$A_1 = 713,5 - 41,7[Mn] - 90,2[Mn][Si] + 102,2[Si] + 11,9[Mn]^2[Si] - 1,37[Mn][Si]^2 + 79,3[Mn][C] - 86,4[Mn][C]^2 - 502,4[Si][C] + 787,7[Si][C]^2 + 330,6[Mn][Si][C] - 588,9[Mn][Si][C]^2 \quad (7)$$

Уравнение регрессии линии GP диаграммы состояния Fe-C:

$$t_{GP} = 911 - 8456[C] - 69958[C]^2. \quad (8)$$

В результате регрессионного анализа термокинетических диаграмм [8–9] методом Ньютона–Рафсона получены коэффициенты уравнения (5) для сталей с массовым содержанием $[C] \leq 0,4\%$, $[Mn] \leq 1,2\%$, $[Si] \leq 0,2\%$. Коэффициенты регрессии, химический состав и температура аустенизации сталей представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Значения коэффициентов к расчету температуры A_{r3}

Nn/n	$C, \%$	$Mn, \%$	$Si, \%$	$t_{aycnp}, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_3, \text{ }^\circ\text{C}$	k	m	n
1	0,05	0,25	0	950	880	0,0089	14,068	0,252
2	0,10	0,40	0	950	856	-0,092	21,793	0,195
3	0,18	0,45	0,20	900	837	-0,131	17,468	0,333
4	0,14	1,00	0,01	870	826	0,959	18,041	0,529
5	0,19	1,20	0,20	870	812	-0,129	51,676	0,198
6	0,40	0,70	0,20	850	778	0,171	55,723	0,303

Таблица 2

Значения коэффициентов к расчету температуры A_{r1}

$N n/n$	$C, \%$	$Mn, \%$	$Si, \%$	$t_{aycnp}, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_3, \text{ }^\circ\text{C}$	k	m	n
1	0,05	0,25	0	950	715	-0,119	44,026	0,156
2	0,10	0,40	0	950	708	-0,609	46,234	0,148
3	0,14	1,00	0,01	870	679	-0,297	32,560	0,321
4	0,18	0,45	0,20	900	708	-1,392	44,832	0,114
5	0,40	0,70	0,20	850	695	-2,304	65,386	0,194

Для расчетной марки стали температуры A_{r3} и A_{r1} определяются по закону линейной интерполяции.

Согласно произведенным расчетам с помощью программы Thermo-Calc[10] тепловыделение при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении чистого железа составляет $136,93 \text{ МДж}/\text{м}^3$, тогда выражение для удельной мощности разогрева стальной полосы при полиморфном превращении можно записать в виде:

$$q_v = \frac{136,93(X^j - X^{j-1})}{\tau^j - \tau^{j-1}}, \text{ МВт}/\text{м}^3. \quad (9)$$

где τ – время, с.

Разработанная математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге

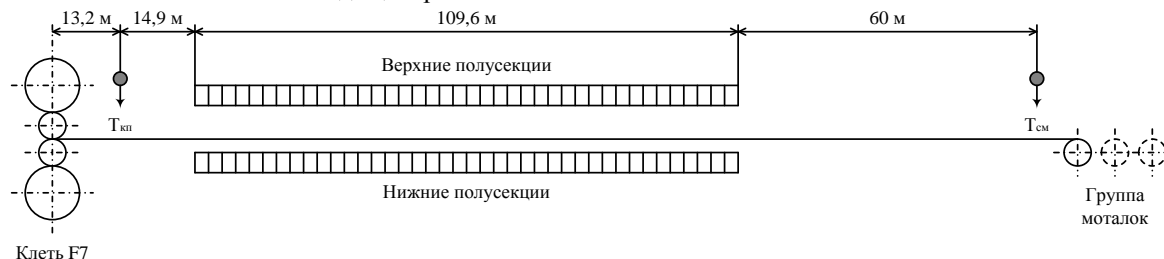


Рис. 2 – Схема отводящего рольганга стана 2000

типоразмером 4×1500 мм, заправочная скорость $7,2$ м/с, по длине отводящего рольганга показан на рисунке 3.

адаптирована для условий непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК» (стан 2000). Существующая на стане установка ускоренного охлаждения состоит из 80 верхних и нижних полусекций, оснащенных коллекторами струйного охлаждения. Схема отводящего рольганга с установкой охлаждения представлена на рисунке 2.

Сравнение расчетных и фактических значений температуры смотки после адаптации математической модели показало, что ошибка расчета температуры смотки превышает 20° менее чем для 2 % полос.

Результат расчета для одного сечения полосы из стали марки СтЗсп

На рисунке 4 приведены диаграммы фактического и расчетного распределения температуры смотки по длине для полосы из низкоуглеродистой марки стали.

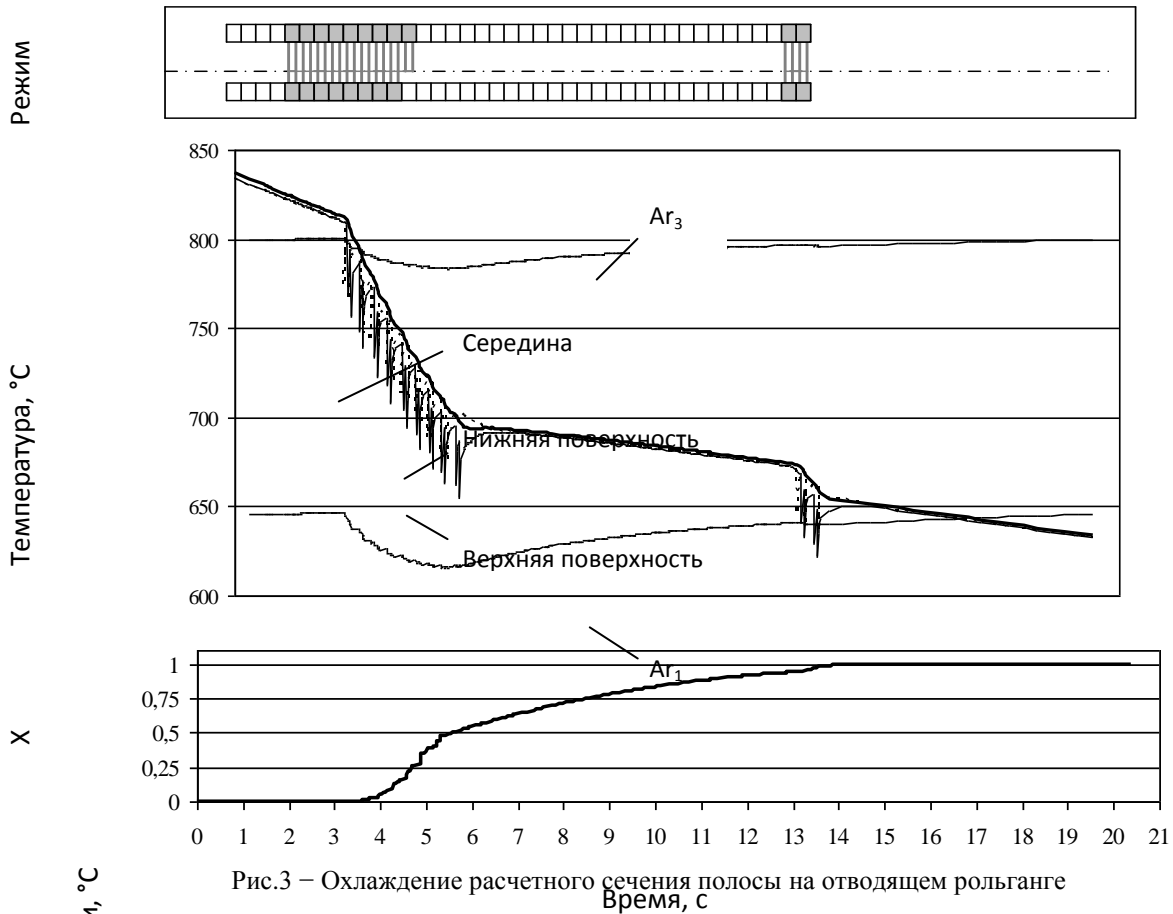


Рис.3 – Охлаждение расчетного сечения полосы на отводящем рольганге

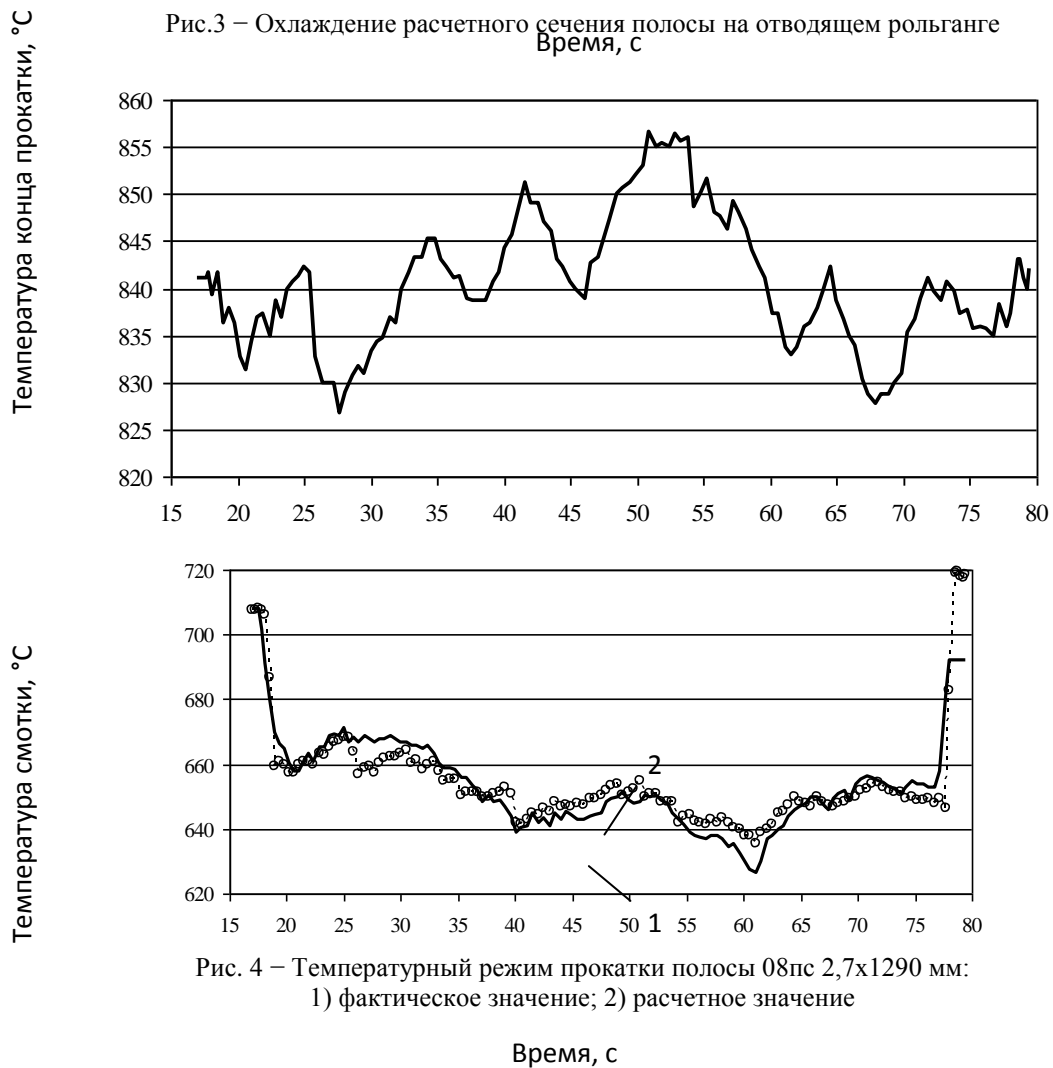


Рис. 4 – Температурный режим прокатки полосы 08пс 2,7х1290 мм:
1) фактическое значение; 2) расчетное значение

Заключение

Разработана математическая модель теплового и фазового состояния полос на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки, учитывающая выделение тепла при полиморфном превращении переохлажденного аустенита. Ошибка расчета температуры смотки по разработанной математической модели не превышает 20° для 98 % полос в широком диапазоне прокатываемого сортамента, химического состава низкоуглеродистых и низколегированных сталей и технологических параметров горячей прокатки.

Разработанная модель может быть использована в составе АСУ ТП при построении алгоритмов автоматического управления установкой ускоренного охлаждения металла на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки или листино-прокатного агрегата.

Список литературы

1. Лабейш, В.Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла / В.Г. Лабейш. – Л.: Издательство ЛГУ, 1983. – 172 с.
2. Ненахов, В.А. Повышение эффективности производства горячекатаных полос за счет оптимизации производственной программы прокатки: дисс... канд. техн. наук. / В.А. Ненахов. – Липецк, 2007.
3. Макаров, Е.В. Исследование и разработка режимов горячей прокатки полос с применением систем ускоренного охлаждения: дисс... канд. техн. наук. / Е.В. Макаров. – Липецк, 2012.
4. Boyadjiev I.I., Thomson P.F., Lam Y.C. Computation of the diffusional transformation of continuously cooled austenite for predicting the coefficient of thermal expansion in the numerical analysis of thermal stress // ISIJ International. 1996. Vol. 36, №11. –P. 1413–1419.
5. Мухин, Ю.А. Взаимосвязь параметров горячей прокатки и кинетики распада переохлажденного аустенита / Ю.А. Мухин, Е.Б. Бобков // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. –№5. –С. 27–29.
6. ASMhandbook. In 21 Volumes. Vol.3. Alloy phase diagrams. USA: ASM International, 1992. – 1741 p.
7. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / Под ред. О.А. Банных, М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
8. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. / Л.Е. Попова, А.А. Попов – М.: Металлургия, 1991. – 503 с.
9. Thompson M., Ferry M., Manohar P.A. Simulation of hot-band microstructure of C-Mn steels during high speed cooling // ISIJ International. 2001. Vol. 41, №8. – P. 891–899.
10. Thermo-Calc Software. URL: <http://www.thermocalc.com/> (дата обращения: 14.05.2012).