

УДК 621.771

Мазур И. П.
Рыбченко М. В.

ВЛИЯНИЕ МЕЖКЛЕТЕВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛОСЫ

Важной проблемой при горячей прокатке полосы является обеспечение регламентированных параметров проката, одним из которых является температура конца прокатки. Для улучшения качества регулирования фактической температуры конца прокатки при увеличении скорости прокатки, эффективным каналом управления является регулируемое охлаждение прокатываемой полосы водой в межклетевых промежутках, позволяющее оперативно воздействовать на температурное поле проката. Использование межклетевого охлаждения в качестве управляющего воздействия при изменении скорости прокатки, позволяет в реальном времени управлять температурой, которая совместно с распределением деформации и скоростью деформации по клетям влияет на формирование структуры и свойств проката [1, 2]. Принудительное охлаждение металла водой в межклетевых промежутках чистой группы широкополосного стана расширяет возможности управления температурой металла, способствуя повышению производительности стана и качества горячекатаных полос.

Целью работы является исследование влияния регулируемого межклетевого охлаждения на температуру полосы. Определение зависимости изменения температуры полосы от интенсивности межклетевого охлаждения водой для использования в алгоритмах первоначальной настройки, управления межклетевым охлаждением и инженерных расчетах.

При повышении скорости прокатки, чтобы обеспечить температуру конца прокатки, необходимо дополнительное межклетевое охлаждение (МКО) полосы [3]. В этом случае снижение температуры в межклетевом промежутке происходит за счет конвекции и принудительного охлаждения водой:

$$\Delta T = \Delta T_k + \Delta T_{\text{МКО}} . \quad (1)$$

Для расчета потерь тепла прокатом вследствие конвективного теплообмена имеется много апробированных зависимостей. Например, можно воспользоваться формулой В. А. Тягунова [4]:

$$\Delta T_k = \frac{t_0 \cdot \tau}{240 \cdot h} , \quad (2)$$

где t_0 – начальная температура полосы в °С; h – высота полосы в метрах; τ – время конвективного теплообмена в секундах.

Для расчета $\Delta T_{\text{МКО}}$ был спланирован и проведен факторный эксперимент, данные которого приведены в табл. 1. При проведении факторного эксперимента интересующие параметры могут быть определены со значительно меньшей ошибкой, чем при традиционных методах исследования [5].

Таблица 1

Факторный эксперимент

№ опыта	Тепловой поток q , Вт/м ²	Время охлаждения τ , с	Толщина полосы h , мм	Температура полосы T_p , °С	Средне-массовая температура полосы $T_{\text{ок}}$, °С	Удельная теплоемкость C , Дж/(Кг·К)	Коэффициент удельной теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Охл 1_1	2000000	0,15	19,0	1000	976,3	460	18
Охл 1_2	1500000	0,12	8,0	900	877,2		
Охл 1_3	1000000	0,05	4,0	800	790,9		

Продолжение таблицы 1

№ опыта	Тепловой поток q , Вт/м ²	Время охлаждения τ , с	Толщина полосы h , мм	Температура полосы T_p , °С	Средне-массовая температура полосы $T_{ок}$, °С	Удельная теплоемкость C , Дж/(Кг·К)	Коэффициент удельной теплопроводности λ , Вт/(мК)
Охл 2_1	2000000	0,15	19,0	1000	982,0	500	30
Охл 2_2	1500000	0,12	8,0	900	882,0		
Охл 2_3	1000000	0,05	4,0	800	792,3		
Охл 3_1	2000000	0,15	19,0	1000	981,5	440	38
Охл 3_2	1500000	0,12	8,0	900	880,8		
Охл 3_3	1000000	0,05	4,0	800	791,2		

Для реализации факторного эксперимента разработана модель теплового состояния элементарного объема полосы, реализованная в комплексе САПР SolidWorks (рис. 1).

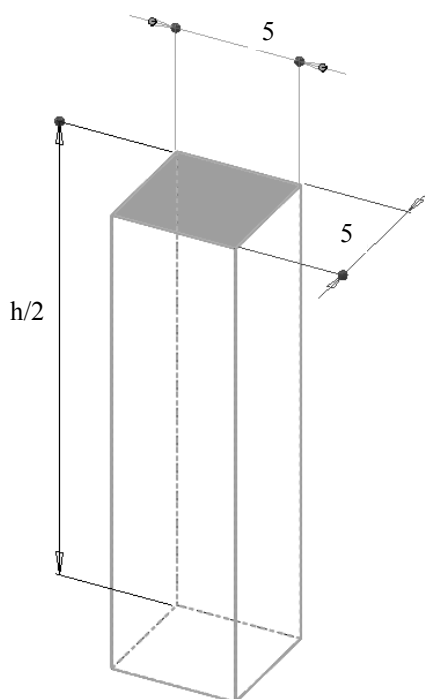


Рис. 1. Элементарный объем полосы

Рассматривая тепловые процессы, протекающие в элементарном объеме, приняты следующие допущения:

- материал полосы изотропен и однороден;
- теплопередача по толщине значительно превышает тепловые потоки по ширине и длине полосы;
- тепловые потоки между соседними объемами не учитываются;
- задача является симметричной относительно центрального сечения по высоте (нижняя плоскость элементарного объема полосы на рис. 1);
- тепловой поток через нижнюю плоскость элементарного объема равен 0;
- тепловой поток через верхнюю плоскость q равен тепловому потоку, снимаемому с поверхности межклетевым охлаждением и пропорционален расходу воды в системе МКО.

Тепловой поток q , отводимый в растекающуюся жидкость, согласно данным работы [6] может быть определен по следующей зависимости:

$$q = 0,92 \frac{\lambda_B \Delta T_B \sqrt{Pe}}{R_\infty}, \quad (3)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); ΔT_B – недогрев воды до температуры кипения ($\Delta T_B = 100 - T_B$), °С; T_B – температура охлаждающей жидкости, °С; R_∞ – радиус струи до встречи с преградой (для щелевых коллекторов $R_\infty = h/2$, h – ширина выходной щели, для струйных $R_\infty = R_{сопла}$); Pe – число Пекле, $Pe = v_\infty R_\infty / a_B$; v_∞ – скорость воды в невозмущенной струе жидкости (скорость истечения жидкости из коллектора, $v_\infty = v_{ист} = Q/S$, Q – расход воды через коллектор, м³/с; S – площадь истечения, м²; для щелевых коллекторов $S_{щ} = h \cdot l$, l – длина коллектора, м; для струйных $S_{смп} = \pi R_{смп}^2 n$, n – количество сопел); a_B – коэффициент температуропроводности воды, м²/с.

В качестве примера на рис. 2 приведено тепловое состояние элементарного объема для эксперимента Охл 1_2 из табл. 1.

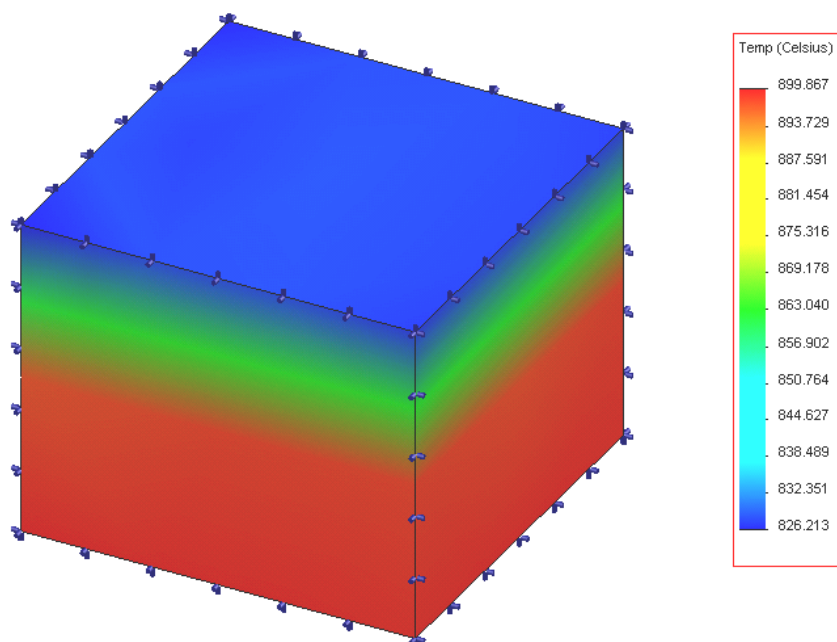


Рис. 2. Тепловое состояние элементарного объема полосы

Согласно [5] поставленный факторный эксперимент является экспериментом типа 3×7 с тремя наблюдениями для каждого экспериментального условия. Так как эксперимент содержит элемент неопределенности вследствие ограниченности обрабатываемых данных, то расстановка повторных или параллельных опытов не дает полностью совпадающих результатов. Получаемая погрешность оценивается стандартными методами усреднения, т. е.:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4)$$

где n – число параллельных опытов.

В нашем случае дисперсия равна:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2. \quad (5)$$

Если учесть, что матрица планирования состоит из серии опытов, то оценка дисперсии всего эксперимента получается в результате усреднения дисперсии всех опытов. В этом случае дисперсия воспроизводимости эксперимента в целом равна:

$$\sigma^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2}{N(n-1)}, \quad (6)$$

где N – число различных опытов (число элементов в матрице планирования); n – число повторных опытов. Для поставленного эксперимента $\sigma^2(y)$ равна 0,022.

Для интерполяции была выбрана функция вида $f = a \cdot \sqrt{x} \cdot e^{-b}$. После интерполяции данной функции было получено следующее соотношение:

$$\Delta T_{\text{МКО}} = a \cdot \sqrt{\tau} \cdot e^{-b}, \quad (7)$$

где $a = \frac{q}{(T + 273) \cdot h}$;

$$b = 9.34 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^8 - 2.34 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^7 + 2.43 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^6 - 1.33 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^5 + 4.27 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^4 - 8.15 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^3 + 9.03 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 - 52861 \cdot \frac{\lambda}{h} + 1245.4 .$$

Данная зависимость применима в диапазоне температур T [800;1000] °С, времени охлаждения τ [0,05; 0,15] с, толщины полосы h [4; 19] мм, удельная теплоемкости C [440; 500] Дж/(Кг·К) и коэффициента удельной теплопроводности λ [18; 38] Вт/(м·К).

В дальнейшем планируется корректировка зависимости (7) по реальным данным работы системы МКО на стане 2000.

ВЫВОДЫ

Получена формула для расчета снижения температуры в межклетевом промежутке стана горячей прокатки в зависимости от интенсивности охлаждения водой, времени охлаждения и теплофизических свойств проката. Формула может быть использована в алгоритмах первоначальной настройки, управления межклетевым охлаждением и инженерных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин А. Л. Алгоритм и система управления показателями качества полосы при горячей прокатке с межклетевым охлаждением раската / Л. А. Генкин, Р. А. Куделин, Р. Л. Шаталов // Производство проката. – 2007. – № 9. – С. 30–36.
2. Райков Ю. Н. Новые технологии прокатного производства / Ю. Н. Райков, Б. А. Сивак, Ю. В. Симаков, Б. А. Моллер // Оборудование. – 2006. – № 3. – С. 40–44.
3. Mazur I. P. Improvement of Consumer Qualities and Stability of the Technological Process of Hot Rolled Stock Production / Materials Science Forum Vols. 575–578 / I. P. Mazur // Trans Tech Publications, Switzerland. – 2008. – PP. 379–384.
4. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник / Ю. В. Коновалов, Л. А. Остапенко, В. И. Пономарёв. – М. : Металлургия, 1986. – 406 с.
5. Ч. Хикс. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс. – М. : Мир, 1967.
6. Лабейш В. Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла / В. Г. Лабейш. – Л. : ЛГУ, 1983. – 172 с.

Мазур И. П. – д-р техн. наук, проф. ЛГТУ;
Рыбченко М. В. – аспирант ЛГТУ.

ЛГТУ – Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

E-mail: pmmbox@yandex.ru