

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОКАТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ СВОЙСТВ

Гинкул С.И., Лебедев А.Н., Новикова Е.В., Струк С.В.

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк)

Получение необходимых эксплуатационных свойств металла зависит от температуры проката. С этой целью разработана математическая модель, которая позволяет на основе решения дифференциального уравнения определить параметры установки (скорость проката, скорость охлаждающей жидкости, ее физические свойства и другие), которые обеспечивают получение заданного температурного поля.

Для получения необходимых эксплуатационных свойств металла применяют ускоренное охлаждение проката. Решение дифференциального уравнения теплопроводности позволяет определить изменение температурного поля металла во времени. Это уравнение имеет вид:

$$c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}[\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial z}] + q_v, \quad (1)$$

где λ_m - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_m - теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ_m - плотность, кг/м³; q_v - тепло, выделяемое от действия внутренних источников тепла, Вт/м³.

В зависимости от формы сечения прокатываемого металла и при отсутствии внутренних источников тепла уравнение (1) преобразуется следующим образом:

$$c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}[\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial r}] + \frac{m}{r}\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial r}, \quad (2)$$

где m - коэффициент формы тела.

При охлаждении круглого профиля коэффициент формы тела $m=1$ и граничные условия имеют вид

- для оси $-\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0$;

- для поверхности $\lambda_m(t)\frac{\partial t}{\partial r}\Big|_{r=r_0} = \alpha_\Sigma(t_{cp} - t_n)$,

где r_0 - радиус проката; α_Σ - коэффициент теплоотдачи при охлаждении водой и на воздухе, Вт/(м²·К); t_{cp} - температура среды у поверхности проката, °С; t_n - температура поверхности металла, °С.

Граничные условия на поверхности охлаждаемого проката определяются температурой насыщения водяного пара $t_{\text{нас}}(p_v)$ при определенном давлении воды p_v по длине камеры охлаждения.

В начальный момент времени $\tau = 0$ температура по сечению тела $t = f(r)$.

Разработана математическая модель для нахождения температурного поля проката, среднемассовая температура которого не отличалась бы от заданной на величину погрешности.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности выполнялось по конечно-разностной схеме методом прогонки [1]. Физические свойства металла и охлаждающей воды определялись из таблиц в зависимости от температуры методом интерполяции.

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих параметров: от размеров и формы проката, от скорости движения жидкости и проката, от физических свойств охлаждающей жидкости.

Давление на входе в камеру может быть определено по зависимости

$$p_{\text{вх}} = \mu_{\text{тр}} \frac{l_k}{d_k} \cdot \frac{\rho_v \cdot w_v^2}{2},$$

где $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь давления от трения; l_k – длина камеры охлаждения, м; d_k – диаметр камеры, м; ρ_v – плотность воды, кг/м³ и w_v – скорость воды (м/с) при средней температуре воды и длине камеры. Изменение давления по длине камеры определялось по формуле [2]

$$p_v = p_{\text{вх}} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\text{охл}}}\right),$$

где τ и $\tau_{\text{охл}}$ – текущее и общее время охлаждения в камере, с; $p_{\text{вх}}$ – давление воды на входе в камеру, кПа.

Коэффициент конвективной теплоотдачи для прямотока определялся по уравнению [3]

$$\alpha_{\text{охл}} = 4,2 \cdot 10^{-10} \frac{\lambda_v \cdot d_{\text{пр}}}{\nu_v^2} \left[w_{\text{абс}}^2 \left(\frac{d_k}{d_{\text{пр}}} \right)^2 + (w_{\text{абс}} - w_{\text{пр}})^2 \left(\frac{\nu_v}{\nu_{\text{нас}}} \right)^2 \right];$$

По средней температуре воды в камере \bar{t}_v по таблицам методом интерполяции определялись кинематическая вязкость ν_v и коэффициент теплопроводности λ_v , а по среднему давлению в камере \bar{p}_v – температура насыщения $t_{\text{нас}}$ и кинематическая вязкость воды $\nu_{\text{нас}}$ на линии насыщения.

Для получения необходимых эксплуатационных качеств металла необходимо, чтобы после выхода из чистовой клетки температура металла соответствовала заданной технологической температуре, которая и определяет требуемые свойства металла.

Одной из задач при проектировании новой охлаждающей установки является определение размеров (длины и диаметра) камеры, при охлаждении в которой проката различных размеров будет обеспечена заданная среднемассовая температура в конце процесса охлаждения. Для существующих установок должна быть решена обратная задача, т.е. целью расчета является определение скоростей движения проката и воды, при которых может быть достигнут требуемый коэффициент теплоотдачи, а значит и необходимая скорость охлаждения.

В настоящей работе исследовался процесс охлаждения проката различного диаметра при длине камеры охлаждения $l_k = 3$ м и камеры выравнивания температур $l_{\text{выр}} = 6$ м при одном прохождении проката. Скорость движения металла для всех рассматриваемых вариантов принималась одинаковой и равной $w_{\text{пр}} = 25$ м/с.

В результате расчетов было получено, что для охлаждения проката диаметром $d = 6,5$ мм от начальной температуры $t_n = 1000^\circ\text{C}$ до среднемассовой температуры $t_m^* = 800^\circ\text{C}$ необходима абсолютная скорость $w_{\text{абс}} = 26$ м/с и коэффициент теплоотдачи в процессе охлаждения должен быть равен $\alpha_{\text{охл}} = 2,25 \cdot 10^4$ Вт/(м²К), а коэффициент теплоотдачи при воздушном охлаждении $\alpha_\Sigma = 92,6$ Вт/(м²К). При этих показателях в результате охлаждения расчетная среднемассовая температура будет равна $\bar{t}_m = 722^\circ\text{C}$.

Снижение среднемассовой температуры до $t_m^* = 600^\circ\text{C}$ приводит к необходимости более интенсивного охлаждения. Для получения коэффициента теплоотдачи при охлаждении $\alpha_{\text{охл}} = 5,78 \cdot 10^4$ Вт/(м²К), обеспечивающего требуемую интенсивность охлаждения, необходима скорость воды $w_{\text{абс}} = 37$ м/с.

Увеличение диаметра проката от 6,5 мм до 13 мм при тех же размерах камеры охлаждения приводит к тому, что для достижения $t_m^* = 800^\circ\text{C}$ необходим коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{охл}} = 5,214 \cdot 10^4$ Вт/(м²К), что может быть получено при скорости движения воды $w_{\text{абс}} = 32$ м/с. При этих условиях температура воды при выходе из установки охлаждения составит $t_v = 92,4^\circ\text{C}$, а ее средняя температура $\bar{t}_g = 54,9^\circ\text{C}$. Это вызвано тем, что увеличение диаметра проката без увеличения диаметра камеры приводит к уменьшению массы воды в камере и более быстрому ее нагреву. Для обеспечения устойчивого движения проката целесообразно иметь соотношение $d_k/d_{\text{пр}} = 3,5 \dots 4,0$; [3].

При диаметре проката $d_{\text{пр}} = 6,5$ мм и диаметре камеры $d_k = 24$ мм охлаждение до среднемассовой температуры $t_m^* = 800^\circ\text{C}$ обеспечивается при абсолютной скорости $w_{\text{абс}} = 26$ м/с и коэффициенте теплоотдачи $\alpha_{\text{охл}} = 2,25 \cdot 10^4$ Вт/(м²К). Увеличение в 2 раза диаметра проката и камеры для охлаждения до той же среднемассовой температуры достигается при абсолютной скорости воды 30 м/с и коэффициенте теплоотдачи $\alpha_{\text{охл}} = 5,65 \cdot 10^4$ Вт/(м²К).

Как видно из таблицы 1, прокат диаметром $d_{пр}=6,5$ мм при начальной заданной абсолютной скорости $w_{абс}=30$ м/с и коэффициенте $\alpha_{охл}=3,26 \cdot 10^4$ Вт/(м²К) охлаждается более интенсивно и его средняя температура получается значительно ниже требуемой. Для повышения среднemasсовой температуры необходимо уменьшить интенсивность охлаждения, что возможно при уменьшении абсолютной скорости воды. Абсолютная скорость воды для достижения заданных условий должна быть уменьшена с 30 м/с до 26 м/с, а коэффициент теплоотдачи при этом снизится с $\alpha_{охл}=3,26 \cdot 10^4$ Вт/(м²К) до $\alpha_{охл}=2,25 \cdot 10^4$ Вт/(м²К).

В таблице 1 приведены результаты расчета различных вариантов по разработанной математической модели

Таблица 1 – Результаты моделирования ускоренного охлаждения проката

№ n/n	Диаметр проката, $d_{пр, мм}$	Диаметр камеры, $d_{к, мм}$	Среднемассовая температура		Средняя по камере температура воды, \bar{t}_e	Абсолютная скорость воды в камере, $w_{абс, м/с}$	Коэффициент теплоотдачи при охлаждении, Вт/(м ² К)	
			заданная, $t_m^*, ^\circ C$	полученная, $t_m, ^\circ C$			водой, $\alpha_{охл} \cdot 10^{-4}$	воздухом, α_Σ
1	6,5	24	800	772,2	28,9	26	2,25	92,6
2	6,5	24	700	713,8	29,8	30	3,26	81,9
3	6,5	24	600	621,9	30,9	37	5,78	67,2
4	13	24	800	839,4	54,9	32	5,14	75,3
5	13	48	800	826	26,8	30	5,65	71,5
6	13	48	700	734S	26,2	51	28,8	50

Увеличению диаметра проката в 2 раза приводит к увеличению термического сопротивления процессу теплопроводности, т.е. к увеличению перепада температуры по сечению, а, следовательно, и возрастанию среднemasсовой температуры до $t_m^* = 800^\circ C$. Для получения среднemasсовой температуры равной заданной с определенной погрешностью необходимо увеличить интенсивность охлаждения, что возможно при абсолютной скорости воды $w_{абс}=32$ м/с, что соответствует коэффициенту теплоотдачи $\alpha_{охл}=5,14 \cdot 10^4$ Вт/(м² К). С другой стороны при увеличении диаметра камеры с $d_k=24$ мм до $d_k=48$ мм, в результате расчета было получено, что абсолютная скорость должна быть равна $w_{абс}=30$ м/с, а коэффициент теплоотдачи $\alpha_{охл}=2,88 \cdot 10^5$ Вт/(м² К)

Для уменьшения конечной температуры необходимо увеличить интенсивность охлаждения. Так в случае уменьшения этой величины с

$t_{\text{м}}^* = 800^{\circ}\text{C}$ до $t_{\text{м}}^* = 700^{\circ}\text{C}$ абсолютная скорость воды должна быть увеличена с 30 м/с до 56 м/с, при этом коэффициент теплоотдачи станет равным $\alpha_{\text{охл}} = 2,88 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Средняя температура воды по длине камеры примерно одинакова для всех случаев и только в варианте 4 температура воды на выходе из установки достигнет $t_{\text{вод}} = 92,4^{\circ}\text{C}$, средняя температура воды $\bar{t}_e = 54,9^{\circ}\text{C}$. Это может быть объяснено тем, что в данном случае соотношение между диаметром камеры и диаметром проката не соответствует рекомендуемым $d_{\text{к}}/d_{\text{пр}} = 3,5 \dots 4,0$, а меньше. Поскольку диаметр проката увеличился с 6,5 мм до 13 мм, то количество воды в камере уменьшилось, а это и привело к повышению температуры воды.

Таким образом, на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности может быть получено температурное поле по толщине проката для различных условий однозначности. Путем варьирования краевыми условиями можно добиться получения заданного температурного поля, которое определяется из требований получения определенных механических и прочностных свойств проката. Приведенные результаты показывают, что поставленная задача может быть решена путем изменения условий охлаждения, а именно изменением скорости проката и воды в установке.

Литература

1. *Тепломассообмен / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкина – Донецк: Норд Пресс, 2006. -298с.*
2. *Математическое моделирование процесса комбинированного охлаждения сортового проката / В.С. Солод, Д.Н. Новиков, М.Н. Тытук, С.И. Гинкул, М.А. Ларченко/ Металл и литье Украины, 2007. -№8. -с.28-30.*
3. *В.И. Губинский, А.Н. Минаев, Ю.В. Гончаров. Уменьшение окатинообразования при производстве проката. – К.: "Техніка", 1981. -136с.*

**© Гинкул С.И., Лебедев А.Н., Новикова Е.В.,
Струк С.В. 2008**