

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОКАТНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ ПРИ КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

©2023 г. **Т.В. Бровман**ФГБОУ ВО Тверской государственный технический университет, Тверь
E-mail: brovman@mail.ru

Поступила в редакцию 14 ноября 2022 г.

После доработки 18 апреля 2023 г. принята к публикации 4 мая 2023 г.

Рассмотрен процесс охлаждения металла отдачей теплоты лучеиспусканием и конвекцией. Применяемые на современных сортовых станах холодильники рассчитывают по величине теплообмена. Предложена формула для расчета длительности охлаждения металла от 850 до 50 °С, дающая результат в 1,78 раза меньший, чем формула, не учитывающая влияния конвективного теплообмена. Для заготовок больших толщин температура поверхности отличается от средней, поэтому использование в расчетах температуры, усредненной по объему холодильника приводит к погрешностям. Уточнение расчета поверхностей излучения повысило точность расчетов процесса охлаждения.

Ключевые слова: конвективный теплообмен; размеры холодильников; время охлаждения.

При выборе длины прокатного холодильника исходят из основного требования его соответствия наибольшей длине поступающих на охлаждение полос, которая определяется при разрезке металла на окончательные длины в горячем или холодном состоянии заготовок.

Ширина холодильника L , м, зависит от производительности прокатного стана и длительности охлаждения металла и может быть определена по формуле

$$L = (P/G)\tau a, \quad (1)$$

где P — наибольшая производительность стана, т/ч; G — масса одной полосы охлаждаемого металла, т; τ — длительность охлаждения полосы, ч; a — расстояние между осями двух полос (шаг холодильника), м.

Данное исследование выполнено с целью уточнить длительность охлаждения металла — параметр, оказывающий существенное влияние на результат расчета размеров холодильника.

Теория вопроса. Для случая расчета длительности охлаждения металла только лучеиспусканием без учета конвекции традиционно используется закон Стефана—Больцмана для определения количества теплоты [1]:

$$Q = F\tau C \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где F — теплоотдающая поверхность, м²; τ — длительность охлаждения, ч; T — температура поверхности охлаждающегося тела, К; T' — температура среды, К; C — постоянная лучеиспускания, Вт/(м²·К⁴), определяемая выражением

$$C = \varepsilon C_s, \quad (3)$$

где C_s — постоянная лучеиспускания для абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε — коэффициент, зависящий от состояния поверхности тела. Для прокатанной стали принимают следующие их значения: $\varepsilon = 0,9$, $C_s = 4,88—5,2$. Тогда по формуле (3) получим $C \approx 4,4$ Вт/(м²·К⁴), а по формуле (2) за время $d\tau$ с поверхности металла во внешнюю среду перейдет количество теплоты

$$dQ = FC \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'}{100} \right)^4 \right] d\tau. \quad (4)$$

В то же время для полосы массой G

$$dQ = GcdT, \quad (5)$$

где c — теплоемкость, Дж/(кг·К).

В дальнейшем расчете температурой среды, которая значительно ниже температуры металла, можно пренебречь. Тогда, используя формулы (4) и (5) для количества теплоты, получим

$$FC \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\tau = GcdT; \quad d\tau = \frac{10^8 Gc}{FC} \frac{dT}{T^4};$$

$$\tau = \frac{10^8 Gc}{FC} \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{T^4} = \frac{Gc}{FC} \frac{10^8}{3} \left[\frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right];$$

$$\tau = 0,033 \frac{Gc}{FC} \left[\left(\frac{1000}{T_2} \right)^3 - \left(\frac{1000}{T_1} \right)^3 \right]. \quad (6)$$

При охлаждении от 850 °С ($T_1 = 1123$ К) до 50 °С ($T_2 = 323$ К) получим следующее выражение для определения длительности охлаждения полосы только за счет лучеиспускания:

$$\tau = 0,033 \frac{Gc}{FC} \left[\left(\frac{1000}{323} \right)^3 - \left(\frac{1000}{1123} \right)^3 \right] =$$

$$= 0,957 \frac{Gc}{FC}. \quad (7)$$

При выводе формулы (6) не учтен конвективный теплообмен, играющий немаловажную роль, в особенности при температурах ниже 500—700 °С. Поэтому длительность охлаждения, рассчитанная по формуле (6), оказывается в 1,5—2 раза больше действительной. Большие отклонения получаются для сортового металла, у которого конвективный теплообмен идет очень интенсивно вследствие образования около полос газовых потоков.

Для практических расчетов время охлаждения определяют из выражения [2]:

$$\tau = (G/F)\tau_0, \quad (8)$$

где τ_0 — длительность охлаждения, ч, прокатного изделия массой 1 кг с теплоотдающей поверхностью 1 м².

Методика проведения эксперимента. Длительность охлаждения заготовки τ_0 зависит от толщины изделия и скорости потока окружающего воздуха. Ее значения приведены в табл. 1 [3]. Скорость воздуха 0 м/с

Таблица 1

Значение длительности охлаждения τ_0 в зависимости от толщины изделия h и скорости потока воздуха 0 (числитель) и 2 м/с (знаменатель)

h , мм	Значение τ_0 , ч, при охлаждении до температуры	
	100 °С	50 °С
20	0,012/0,007	0,018/0,010
50	0,013/0,009	0,021/0,013
100	0,015/0,011	0,022/0,016

принята для случая охлаждения листов и широких полос, а скорость воздуха 2 м/с — при охлаждении сортового металла.

Рассмотрим процесс охлаждения металла при отдаче теплоты как лучеиспусканием, так и конвекцией. Если пренебречь температурой внешней среды, то за время $d\tau$ за счет излучения во внешнюю среду от металла передается количество теплоты, определяемое выражением:

$$dQ_1 = FC(T/100)^4 d\tau. \quad (9)$$

За то же время количество теплоты за счет охлаждения конвекцией определяется выражением

$$dQ_2 = \alpha F(T - T_0) d\tau, \quad (10)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; T — температура металла, К; T_0 — температура воздуха, К.

Таким образом, при охлаждении на величину dT теплоотдача металла составит:

$$dQ = GcdT; \quad dQ = dQ_1 + dQ_2. \quad (11)$$

Из формул (9)—(11) получаем:

$$FC(T/100)^4 d\tau + \alpha F(T - T_0) d\tau = GcdT;$$

$$d\tau = \frac{GcdT}{FC(T^4/10^8) + \alpha FT - \alpha FT_0};$$

$$\tau = \int_{T_2}^{T_1} \frac{Gc10^8}{FC} \frac{dT}{T^4 + 10^8 \frac{\alpha}{C} T - 10^8 \frac{\alpha}{C} T_0}. \quad (12)$$

Введем следующие обозначения в выражение (12):

$$10^8 \frac{\alpha}{C} = a; \quad 10^8 \frac{\alpha}{C} T_0 = b. \quad (13)$$

С использованием a и b из уравнений (13) преобразуем выражение (12):

$$\tau = \int_{T_2}^{T_1} \frac{Gc}{FC} 10^8 \frac{dT}{T^4 + aT - b}. \quad (14)$$

После разложения функции $1/(T^4 + aT - b)$ в ряд, который быстро сходится, для достижения требуемой точности ограничимся тремя членами:

$$\frac{1}{T^4 + aT - b} = \frac{1}{T^4} - \frac{a}{T^7} + \frac{b}{T^8} - \dots \quad (15)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \int \frac{dT}{T^4 + aT - b} &= \int \frac{dT}{T^4} - a \int \frac{dT}{T^7} + b \int \frac{dT}{T^8} = \\ &= -\left(\frac{1}{3T^3} - \frac{a}{6T^6} + \frac{b}{7T^7} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, с учетом уравнений (15), (16) уравнение (14) приводим к виду:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{10^8 Gc}{FC} \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right) - \frac{a}{6} \left(\frac{1}{T_2^6} - \frac{1}{T_1^6} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{b}{7} \left(\frac{1}{T_2^7} - \frac{1}{T_1^7} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

или после подстановки значений a и b :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Gc}{FC} \left\{ 0,033 \left[\left(\frac{1000}{T_2} \right)^3 - \left(\frac{1000}{T_1} \right)^3 \right] - \right. \\ &\quad - 0,00167 \frac{\alpha}{C} \left[\left(\frac{1000}{T_2} \right)^6 - \left(\frac{1000}{T_1} \right)^6 \right] + 0,142 \times \\ &\quad \times 10^{-5} \frac{\alpha}{C} T_0 \left[\left(\frac{1000}{T_2} \right)^7 - \left(\frac{1000}{T_1} \right)^7 \right] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

При охлаждении мелкосортной стали от 850 до 50 °С используют формулу (18), приведенную к следующему виду:

$$\tau = \frac{Gc}{FC} \left[0,957 - 1,46 \frac{\alpha}{C} + 0,004 \frac{\alpha}{C} T_0 \right]; \quad (19)$$

при температуре воздуха 25—30 °С, или $T \approx 300$ К, имеем:

$$\tau = \frac{Gc}{FC} (0,957 - 0,07\alpha). \quad (20)$$

Формула (18) для расчетов охлаждения металла от 800 до 400 °С (на непрерывных заготовочных станах) имеет вид:

$$\tau = \frac{Gc}{FC} (0,08316 - 0,0023\alpha). \quad (21)$$

Приведенные формулы (19)—(21) удобны для расчетов. Коэффициент теплоотдачи α определяется для условия конвективного теплообмена. При охлаждении тела в газовой среде возможны три режима ее движения: ламинарный (наблюдается при малых температурных перепадах); «локонообразный» (большие перепады температуры) и вихревой (очень большие перепады температуры).

При охлаждении металла после прокатки возможны температурные перепады Δt до 800 °С, что вызывает вихревое движение воздуха, при котором по данным [4]

$$\alpha = A_3 \Delta t^{1/3}, \quad (22)$$

где A_3 — коэффициент, зависящий от температуры среды. Для воздуха его значения приведены в табл. 2 [4].

Таблица 2

Зависимость коэффициента A_3 от температуры среды (для воздуха)

$t, ^\circ\text{C}$	A_3	$t, ^\circ\text{C}$	A_3
0	1,45	300	0,85
50	1,27	500	0,70
100	1,14	1000	0,48
200	0,97		

В примере для мелкосортной стали при средней температуре процесса охлаждения $t_{\text{ср}} = (850 + 50)/2 = 450$ °С температурный перепад составляет $\Delta t = 450 - 30 = 420$ °С, при этом $A_3 \approx 0,8$. Следовательно, $\alpha \approx 0,8 \sqrt[3]{420} \approx 0,8 \cdot 7,5 \approx 6$. Тогда по формуле (20) получим:

$$\tau = \frac{Gc}{FC} (0,957 - 0,07 \cdot 6) = 0,537 \frac{Gc}{FC}. \quad (23)$$

Подставляя имеющиеся данные в формулу (7), получаем $\tau = 2,85$ ч. При расчете по

формуле (8) длительность охлаждения составляет лишь 1,28 ч, а по формуле (23), т.е. с учетом конвекции, — 1,5 ч.

Соответствующие данные получены на практике и для сортового металла.

Результаты исследования. Применяемые на современных сортовых станах холодильники рассчитывают по величине теплообмена. Для описания процесса теплообмена используются следующие размерные параметры: теплоемкость c , Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К); плотность металла γ , кг/м³; постоянная лучеиспускания C , Вт/(м²·К⁴); размер сечения d , м, заготовки (для круга — это диаметр, для квадрата — его толщина); коэффициент теплоотдачи при конвекции α , Вт/(м²·К); длительность охлаждения τ , ч; средняя температура проката (начальная T_1 , конечная T_2) и температура окружающей среды T_0 , К. Составляют пять безразмерных параметров:

$$a = \frac{CT_0^3\tau}{c\gamma d} = \frac{CT_0^3F\tau}{cG}; \quad b = \frac{a}{CT_0^3};$$

$$Bi = \frac{\alpha d}{\lambda}; \quad x_1 = \frac{T_1}{T_0}; \quad x_2 = \frac{T_2}{T_0};$$

где G — масса единицы длины проката; F — площадь ее поверхности, так что $G/F = 0,25\gamma d$.

Приведенные безразмерные параметры учитываются в следующей формуле:

$$\tau = \frac{c\gamma d}{4CT_0^3} f(b, Bi, x_1, x_2). \quad (24)$$

Функция f определяется на основе уравнения теплового баланса

$$f(x_1, x_2) = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x^4 + bx - b - 1}, \quad (25)$$

где $x = T/T_0$.

Используя формулу (25), получаем

$$f(x) = \frac{1}{b+4} \left\{ \ln(x-1) - a_1 \ln(x+x_0) - a_2 \ln x^2 - (x_0-1)x + x_0^2 - x_0 + 1 - a_3 \arctg \left(\frac{2x - x_0 + 1}{a_4} \right) \right\}, \quad (26)$$

где $(-x_0)$ — корень уравнения $x^4 + bx - b - 1 = 0$.

Выражения для коэффициентов $a_1, \dots, a_4$:

$$a_1 = \frac{x_0^2 - 2x_0 + 3}{3x_0^2 - 2x_0 + 1}, \quad a_2 = \frac{x_0^2 - 1}{3x_0^2 - 2x_0 + 1},$$

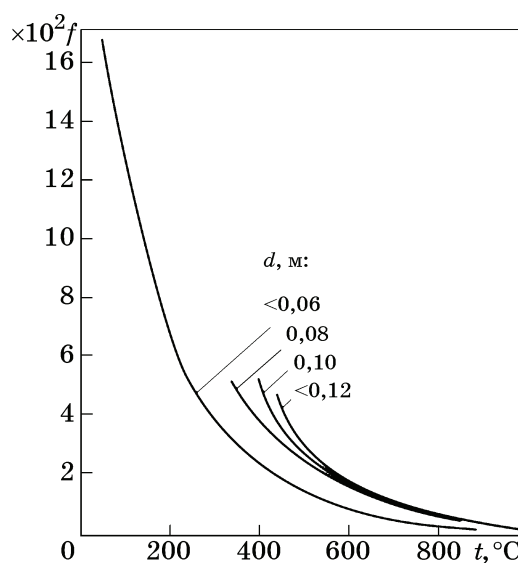
$$a_3 = \frac{4x_0(x+1)}{a_4(3x_0^2 - 2x_0 + 1)}, \quad a_4 = \sqrt{3x_0^2 - 2x_0 + 3}.$$

Согласно экспериментальным данным [1—3] постоянная лучеиспускания при охлаждении на воздухе $C = 3,6—4,2$ Вт/(м²·К⁴); $\alpha = 5—10$ Вт/(м²·К⁴).

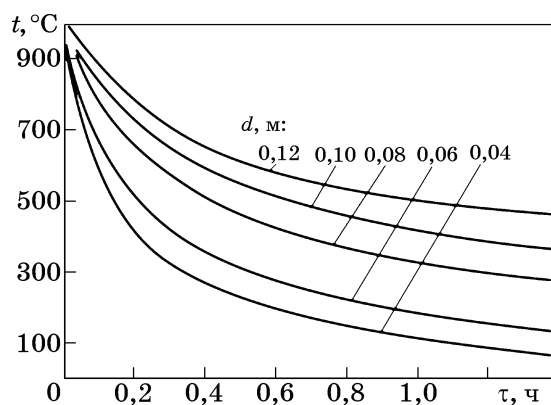
Подставив в формулу (26) при $T_0 = 300$ К величины $b = 5,0$; $x_0 = 2,0$; $a_1 = a_2 = 1/3$, $a_3 = 0,8$; $a_4 = 3,32$ для процесса охлаждения от $x_1 = 3,91$ ($T_1 = 1173$ К) до $x_2 = 1,243$ ($T_2 = 373$ К), получаем $F(x_1) = -0,172$, $F(x_2) = -0,306$; $f(x_1, x_2) = 0,134$; по формуле (24) получаем длительность охлаждения $\tau = 1,14$ ч. Графики функции $f(x)$, построенные на основе численных расчетов, приведены на фиг. 1. На фиг. 2 показаны экспериментальные данные по охлаждению заготовок из углеродистых сталей при разных значениях размера сечения d .

Функция $\tau(T_1, T_2)$, определенная по аналитическим или эмпирическим формулам, должна удовлетворять определенному условию.

Охлаждение заготовки от температуры T_1 до T_2 можно представить последовательностью двух процессов: охлаждение от начальной до промежуточной температуры T , $T_2 < T < T_1$ за время τ_1 ; охлаждение от про-



Фиг. 1. Графики функции $f(t)$



Фиг. 2. Изменение температуры при охлаждении заготовок разных сечений d

межуточной температуры T (начальной) до температуры T_2 за время τ_2 . Если результат расчета длительности охлаждения заготовки в интервале от T_1 до T_2 равен τ , то при любом значении T должно выполняться функциональное уравнение

$$\tau_1(T_1, T) + \tau_2(T, T_2) = \tau(T_1, T_2).$$

Для заготовок больших толщин температура поверхности отличается от средней, поэтому усреднение температуры по объему приводит к погрешностям. Уточнение расчета поверхностей излучения и величин α [4, 5] повышает точность расчетов процесса охлаждения, хотя и не учитывает перепад температур по толщине заготовки. Расчеты, выполненные методом конечных разностей, и решение уравнений теплопроводности Фурье подтверждают допустимость применения формулы (25) для условия охлаждения заготовок толщиной $d \leq 0,04$ м, что учтено на графиках, приведенных на фиг. 1.

Выводы. 1. Расчеты квадратичных отклонений функции времени $\tau(c, \lambda, S, d, \alpha, T_1, T_2, T_0)$ при изменении аргументов на величину

$\Delta c, \Delta \lambda, \dots, \Delta T_0$ показали, что наибольшее влияние при $T_2 < 470$ К оказывают изменения длительности охлаждения τ за счет колебаний величин начальной и конечной температур охлаждаемой заготовки.

2. Конвективный теплообмен по боковым поверхностям заготовки имеет место и при снижении температуры, когда доля теплоты, отведенной конвекцией, возрастает, а теплоотвод излучением снижается. Эти поверхности начинают оказывать существенное влияние на процесс теплообмена.

3. При увеличении расстояния между заготовками длительность охлаждения уменьшается, но увеличивается площадь теплоотдачи. Поэтому необходимы конструкции холодильников с близким расположением заготовок, с разделением их водоохлаждаемыми экранами, которые обеспечат теплоотвод от боковых поверхностей заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман, М.Я. Деформация ползучести при изменении температуры / М.Я. Бровман // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2019. №3. С.108—117.
2. Бровман, М.Я. Кристаллизаторы установок непрерывного литья металлов / М.Я. Бровман. — М.: Теплотехник, 2011. 425 с.
3. Бровман, Т.В. Определение размеров холодильников прокатных станов при изготовлении функциональных материалов / Т.В. Бровман // Матер. IX междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (3—7 октября 2022). — Суздаль: [б.и.]. 2022. С.21.
4. Бровман, М.Я. О функциях, применяемых для описания пластической деформации металлов / М.Я. Бровман // Металлы. 2011. №1. С.12—23. — (Brovman, M.Y. On the functions used to describe the plastic deformation of metals / M.Y. Brovman // Russian Metallurgy (Metally), 2011. №1. P.9—18.)
5. Дубинский, Ф.С. Методы проектирования температурных режимов горячей сортовой прокатки: учеб. пособ. / Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 18 с.