

РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ РОЛИКАМИ И ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Канд. техн. наук, доц. Е.В. ГОЛИЦЫНА, докт. техн. наук, проф. Ю.Р. ОСИПОВ,

канд. техн. наук, доц В.В. ПАВЛОВ

Рассматривается влияние локальных угловых коэффициентов теплообмена излучением при расчете тепловых процессов, протекающих в роликах машины непрерывного литья заготовок. Получены зависимости коэффициентов теплообмена излучением с широкой и узкой гранями слитка от осевой и угловой координат.

В последние годы продолжает развиваться технология непрерывной разливки стали, запускаются в эксплуатацию новые машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), модернизируются старые машины. Технологическая линия МНЛЗ содержит несколько десятков роликов. В процессе работы ролики подвергаются существенным колебаниям температуры, вызывающим термические напряжения, сокращающие срок службы роликов. Средняя стойкость роликов составляет около 2000 – 4000 плавов [1]. Из-за выхода из строя роликов и их подшипников почти каждые 2 – 3 месяца МНЛЗ приходится останавливать на ремонт [2].

Аналитическое исследование теплового состояния элементов металлургических машин позволит выбрать наиболее подходящие для них конструктивные параметры с целью увеличения срока службы этих элементов. При расчете тепловых процессов, протекающих в роликах МНЛЗ, необходимо учитывать теплообмен излучением со слитком. Для этого нужно знать локальные угловые коэффициенты излучения.

Теплообмен излучением с широкой гранью слитка.

Возьмем произвольным образом точку M_1 на поверхности слитка и точку M_2 на боковой поверхности ролика (рис. 1). В системе (x, y, z') точки имеют координаты: $M_1(x, 0, z')$, $M_2(0, \bar{y}, 0)$, где $\bar{y} = R_1(1 - \cos\varphi)$.

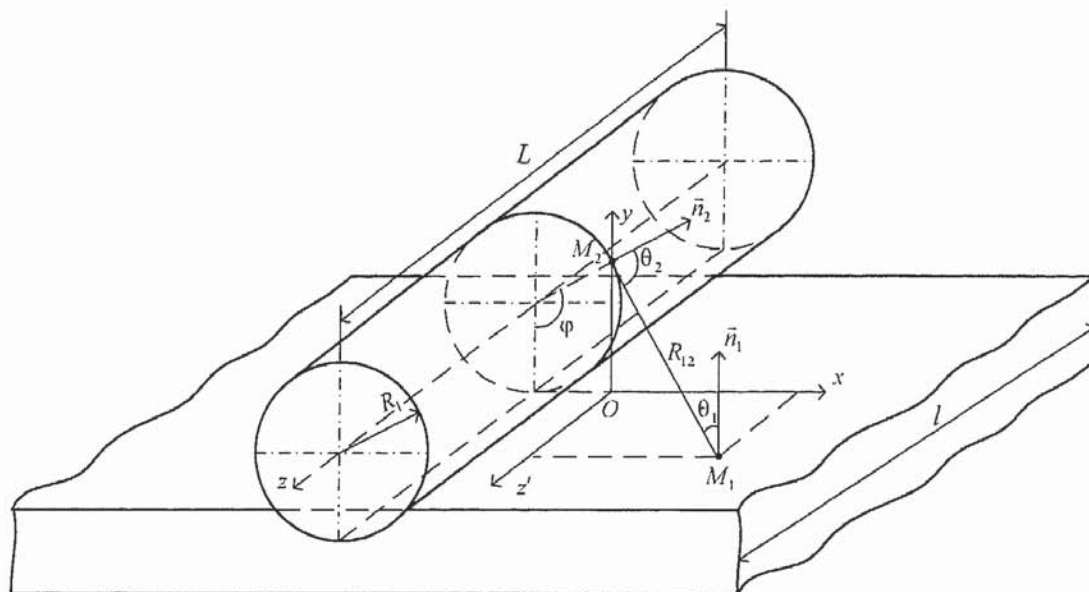


Рис. 1. Схема к расчету угловых коэффициентов

В работе [3] было получено выражение $\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{(M_1 M_2)^2} = \frac{\bar{y}(x \sin\varphi + \bar{y} \cos\varphi)}{(x^2 + \bar{y}^2 + z'^2)^2}$. При расчетах

предполагалось, что на точку M_2 попадает излучение с полосы шириной BD (рис. 2).

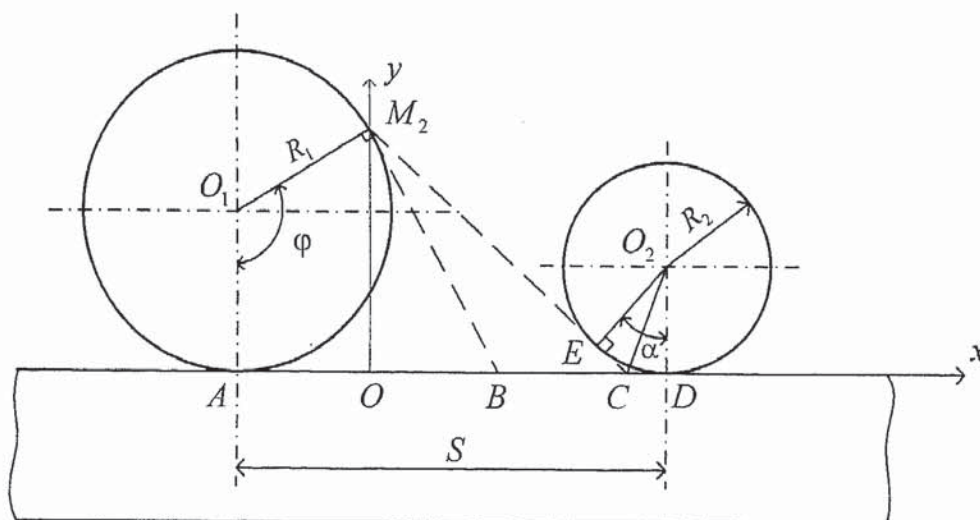


Рис. 2. Схема поперечного сечения

На самом деле на точку M_2 попадает излучение с полосы шириной BC . Поэтому координата x изменяется в пределах от $x_1 = -\bar{y} \operatorname{ctg}\varphi$ до $x_2 = OC$, где $OC = a_1 - R_2 \operatorname{tg}(\alpha/2)$,

$a_1 = S - R_1 \sin\varphi$. Учитывая условие ортогональности векторов $\overline{M_2 E}$ и $\overline{O_2 E}$, находим $\operatorname{tg}(\alpha/2)$ и получаем, что

$$x_2 = \begin{cases} \frac{a_1 a_2 + R_2 \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - R_2^2}}{R_2 + a_2}, & \text{если } \bar{y} \neq 2R_2, \\ a_1 - 2R_2^2/a_1, & \text{если } \bar{y} = 2R_2, \end{cases}$$

где $a_2 = R_2 - \bar{y}$.

Координата z' зависит от координаты z и изменяется в пределах от $\tilde{z}_1 = \bar{z}_1 - z$ до $\tilde{z}_2 = \bar{z}_2 - z$, где $\bar{z}_1 = (L - l)/2$, $\bar{z}_2 = (L + l)/2$.

Локальный угловой коэффициент излучения $\psi(\varphi, z)$ определяется по формуле:

$$\psi(\varphi, z) = \frac{\bar{y}}{\pi} \int_{-\bar{y} \operatorname{ctg} \varphi}^{x_2} dx \int_{\tilde{z}_1}^{\tilde{z}_2} \frac{x \sin \varphi + \bar{y} \cos \varphi}{(x^2 + \bar{y}^2 + z'^2)^2} dz'.$$

Вычисляя интеграл, получаем:

$$\psi(\varphi, z) = \begin{cases} g_2(\varphi, z) - g_1(\varphi, z), & \text{если } \varphi \in (0, \varphi_2], \quad \tilde{z}_1 \neq 0, \quad \tilde{z}_2 \neq 0, \\ g_2(\varphi, z), & \text{если } \varphi \in (0, \varphi_2], \quad \tilde{z}_1 = 0, \\ -g_1(\varphi, z), & \text{если } \varphi \in (0, \varphi_2], \quad \tilde{z}_2 = 0, \end{cases}$$

где

$$g_k(\varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{x_2 \cos \varphi - \bar{y} \sin \varphi}{\sqrt{x_2^2 + \bar{y}^2}} \operatorname{arctg} \frac{\tilde{z}_k}{\sqrt{x_2^2 + \bar{y}^2}} + \operatorname{arctg} \left(\frac{\tilde{z}_k}{R_1} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right) + \right. \\ \left. + \tilde{z}_k \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\bar{y}^2 + \tilde{z}_k^2}} \left(\operatorname{arctg} \frac{x_2}{\sqrt{\bar{y}^2 + \tilde{z}_k^2}} + \operatorname{arctg} \frac{R_1 \operatorname{tg}(\varphi/2) \cos \varphi}{\sqrt{\bar{y}^2 + \tilde{z}_k^2}} \right) \right\},$$

$\varphi_2 = 2 \operatorname{arctg} \frac{S + \sqrt{S^2 - 4R_1 R_2}}{2R_1}$ – это угол, на котором происходит лучистый теплообмен с широ-

кой гранью слитка.

По полученной формуле проведены расчеты локального коэффициента излучения для ролика радиусом $R_1 = 0,135$ м; длиной $L = 2,1$ м. Вычисления проводились при следующих данных: шаг роликов $S = 0,356$ м; ширина слитка $l = 1,2$ м; радиус соседнего ролика $R_2 = 0,165$ м.

Результаты вычислений локального углового коэффициента ψ приведены на рис. 3 – 5.

На рис. 3 видно, что чем меньше угол φ (чем ближе поверхность ролика к широкой грани слитка), тем круче градиент функции ψ в точках \bar{z}_1 и \bar{z}_2 . По ширине слитка угловой коэффициент изменяется мало.

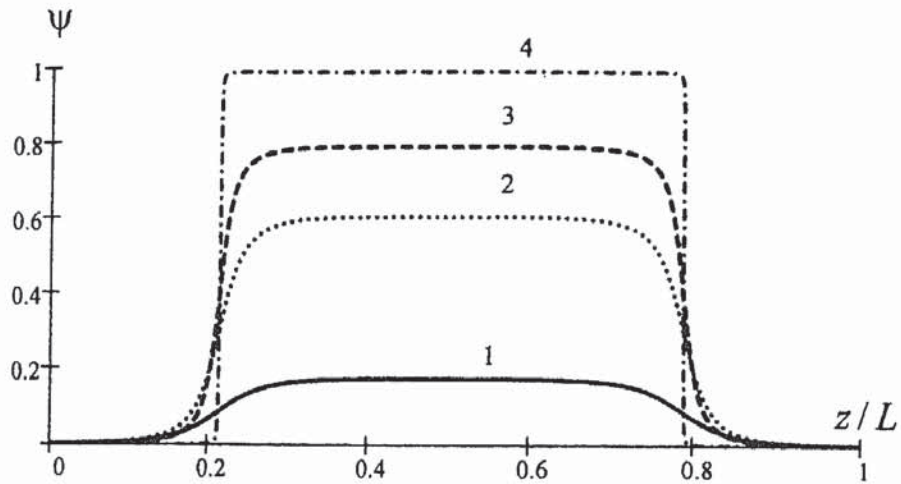


Рис. 3. Зависимость коэффициента излучения с широкой гранью слитка от осевой координаты
 1 – $\varphi = \pi/2$; 2 – $\varphi = \pi/3$; 3 – $\varphi = \pi/4$; 4 – $\varphi = \pi/18$

Зависимость ψ от угловой координаты более существенная (рис.4). Причем на участке $z \in [0, \bar{z}_1)$ (конец ролика, не соприкасающийся со слитком) максимум углового коэффициента с возрастанием Z увеличивается, и точка максимума сдвигается влево, а на участке $z \in (\bar{z}_1, L/2]$ максимум равен 1 и не зависит от Z .

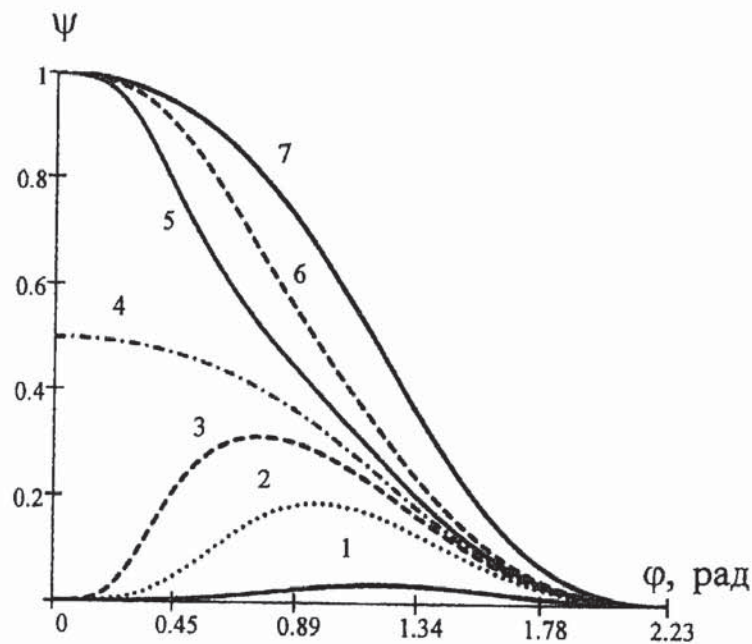


Рис. 4. Зависимость коэффициента излучения с широкой гранью слитка от угловой координаты
 1 – $z = 0,32$ м; 2 – $z = 0,42$ м; 3 – $z = 0,44$ м; 4 – $z = \bar{z}_1$ м;
 5 – $z = 0,46$ м; 6 – $z = 0,48$ м; 7 – $z = L/2 = 1,05$ м

С увеличением шага роликов S функция ψ с возрастанием координаты φ убывает медленнее (рис. 5).

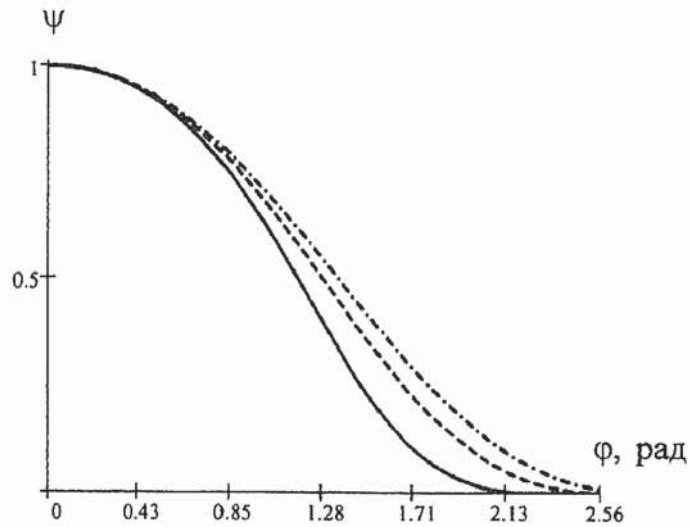


Рис. 5. Коэффициент излучения с широкой гранью слитка при $z = L/2$ м
 — — $S = 0,356$ м; - - - - $S = 0,5$ м; - · - · - $S = 0,7$ м

Изменение же радиуса R_2 соседнего ролика оказывает на угловой коэффициент незначительное влияние. С увеличением R_2 функция ψ убывает быстрее.

Теплообмен излучением с узкой гранью слитка.

Рассмотрим теплообмен излучением на концах ролика (рис. 6).

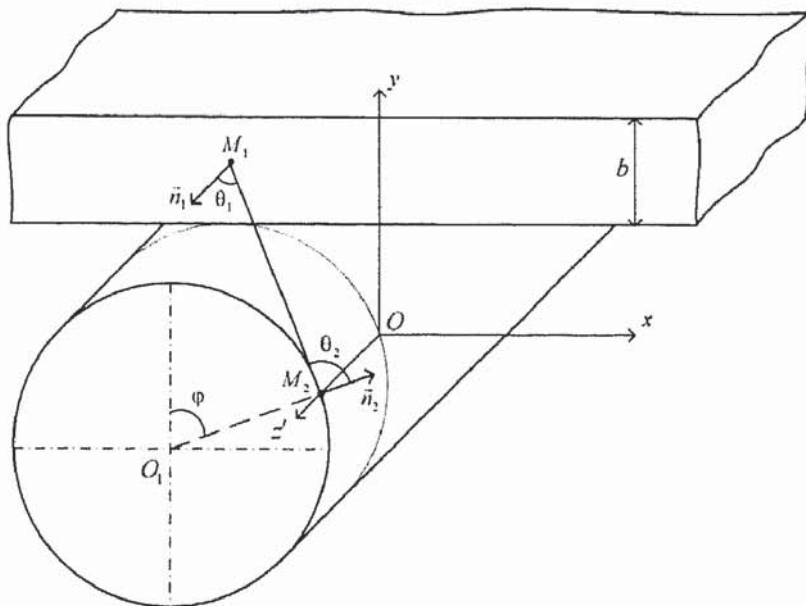


Рис. 6. Схема к расчету угловых коэффициентов на концах ролика

Обозначим произвольную точку, находящуюся на узкой грани слитка, через M_1 , а точку, находящуюся на боковой поверхности ролика, — через M_2 . Эти точки в системе (x, y, z')

имеют координаты $M_1(x, y, 0)$, $M_2(0, 0, z')$. Тогда $\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{R_{12}^2} = z' \frac{x \sin\varphi + y \cos\varphi}{(x^2 + y^2 + z'^2)^2}$ и ло-

кальный угловой коэффициент излучения вычисляется по формуле:

$$\Psi_2(\varphi, z') = \begin{cases} \frac{z'}{\pi} \int_{\bar{y}}^{b+\bar{y}} dy \int_{c_1 y}^{c_2 y} \frac{x \sin\varphi + y \cos\varphi}{\{x^2 + y^2 + z'^2\}^2} dx, & \text{если } \varphi \neq 0, \\ \frac{z'}{\pi} \int_0^b dy \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y}{\{x^2 + y^2 + z'^2\}^2} dx, & \text{если } \varphi = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $c_1 = -\text{ctg}\varphi$, $c_2 = x_2/\bar{y}$.

Вычисляя первый интеграл в (1), находим:

$$\Psi_2(\varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{c_2 \cos\varphi - \sin\varphi}{\sqrt{c_2^2 + 1}} \arctg \frac{b z' \sqrt{c_2^2 + 1}}{z'^2 + \bar{y}(\bar{y} + b)(c_2^2 + 1)} + \right. \\ \left. + \arctg \frac{b z' \sin\varphi}{z'^2 \sin^2\varphi + \bar{y}(\bar{y} + b)} + h_1(\varphi, z') - h_2(\varphi, z') \right\}, \quad \varphi \in (0, \varphi_2], \quad z' \in [0, \bar{z}_1],$$

где $h_k(\varphi, z') = h_{k,1}(\varphi, z') - h_{k,0}(\varphi, z')$, $h_{k,j}(\varphi, z') = \frac{z' \cos\varphi}{\sqrt{t_j^2 + z'^2}} \arctg \frac{c_k t_j}{\sqrt{t_j^2 + z'^2}}$, $t_j = b j + \bar{y}$,

$z' = \bar{z}_1 - z$ при $z \in [0, \bar{z}_1)$, $z' = z - \bar{z}_2$ при $z \in (\bar{z}_2, L]$.

Вычисляя второй интеграл в (1), получаем: $\Psi_2(0, z') = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{z'}{\sqrt{b^2 + z'^2}} \right)$.

Результаты вычислений локального углового коэффициента Ψ_2 приведены на рис. 7, 8.

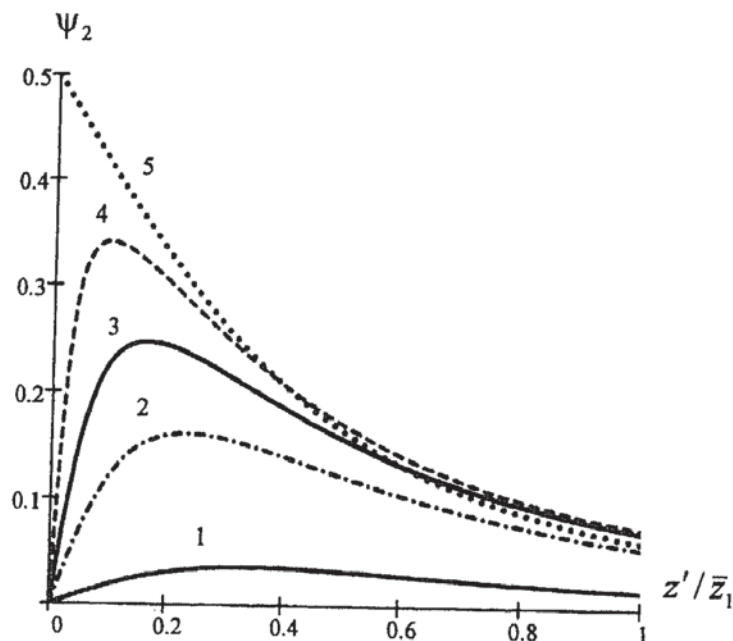


Рис. 7. Зависимость коэффициента излучения с узкой гранью слитка от осевой координаты
1 — $\varphi = \pi/2$; 2 — $\varphi = \pi/3$; 3 — $\varphi = \pi/4$; 4 — $\varphi = \pi/6$; 5 — $\varphi = 0$

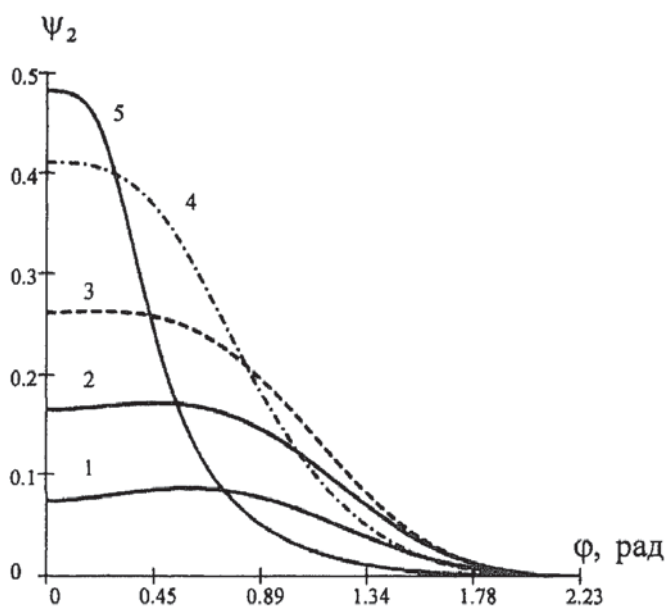


Рис. 8. Зависимость коэффициента излучения с узкой гранью слитка от угловой координаты

$$1 - z' = 0,9 \cdot \bar{z}_1; \quad 2 - z' = 0,5 \cdot \bar{z}_1; \quad 3 - z' = 0,3 \cdot \bar{z}_1;$$

$$4 - z' = 0,1 \cdot \bar{z}_1; \quad 5 - z' = 0,02 \cdot \bar{z}_1$$

С удалением от узкой грани максимум функции Ψ_2 уменьшается, и точка максимума сдвигается вправо (рис. 7). Чем ближе поперечное сечение ролика к слитку, тем быстрее с возрастанием координаты φ убывает Ψ_2 (рис. 8). Изменение радиуса R_2 соседнего ролика и шаг роликов S мало влияют на локальный угловой коэффициент.

Выводы

Полученные аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов излучения с широкой и узкой гранью слитка позволяют учитывать разные диаметры соседних роликов, шаг между ними, ширину и толщину слитка, длину роликов. Анализ проведенных вычислений коэффициентов показал, что при инженерных расчетах можно считать, что по ширине слитка функция Ψ зависит только от координаты φ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика расчета долговечности роликов машин непрерывного литья заготовок. Руководящий технический материал (РТМ 24.113.02-81). - Издание официальное. - М.: ЦНИИТЭИтяжмаш. - 1981. - 32 с.

2. Иванченко И.Ф., Матюхин А.В. Усовершенствование опорных элементов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1980. – № 4. – С. 42 – 43.
3. Бауман Г.Г., Шефер Г. Температура и термические напряжения в роликах и валках // *Черные металлы*. – 1971. – № 12. – С. 11 – 18.