

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"

POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Beskid Śląski, 1990

Павел А. Левин

Донецкий Политехнический Институт, СССР

ГИДРОДИНАМИКА СМАЗОЧНОГО СЛОЯ  
МЕЖДУ НЕПРЕРЫВНОМ СЛИТКОМ И КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ

**Резюме :** Рассмотрена неизотермическая задача динамики смазочного слоя. Получены зависимости оптимизации вязкости расплава шлакообразующей смеси, подаваемой в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок.

1. Введение

В машинах непрерывного литья заготовок (НИЛЗ, рис. 1) на менник хрупкого металла в кристаллизатор подают затвердевающую смесь. Расплавленная смесь в ходе вытягивания слитка увлекается зазор между затвердевающей коркой и рабочими стенками. Образующийся жидкий смазочный слой и затвердевающий на стенках горячек, заполняя неровности поверхности слитка, уменьшают трение и неравномерность теплоотвода. В сочетании с качаниями кристаллизатора по определенному закону это позволяет предотвратить приваривание металла к рабочим стенкам и обеспечить стабильность процесса литья [1].

Результаты ряда экспериментальных работ [2-4] показали, что для тех или иных конкретных условий литья существует оптимальное значение вязкости шлакового расплава, при котором трение в кристаллизаторе минимально. Однако известные рекомендации носят эмпирический характер, что сужает область их применения. В настоящей работе сделана попытка создать математическую модель смазочного слоя.

2. Математическая модель смазочного слоя

Введем обозначения (кроме указанных на рис. 2) :

$x, y$  - продольная и поперечная координата слоя,

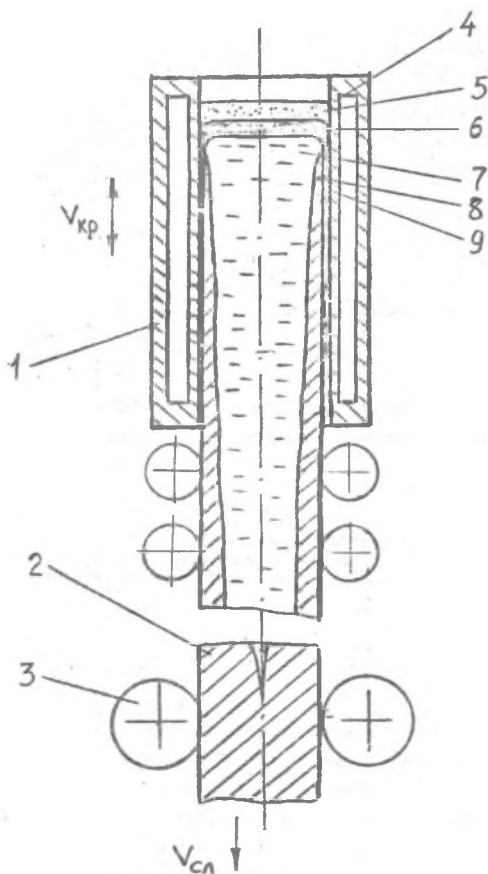


Рис. 1. Схема непрерывного литья заготовок; 1-кристаллизатор, 2-непрерывный слиток, 3-тянущие валки, 4-водохлаждаемые рабочие стенки кристаллизатора, 5-сыпучий слой шлакообразующей смеси, 6-шлаковый расплав, 7-жидкий металл, 8-затвердевающая корка слитка, 9-смазочный слой между коркой и рабочими стенками.

$u_x, u_y$  - составляющие скорости шлакового расплава слоя,

$t, g$  - время и ускорение силы тяжести,

$\rho_c, \rho_m$  - плотности расплавов смеси и металла,

$\eta_n, \eta_o$  - динамическая вязкость смазки на границе с поверхностью металла и ее значение при температуре затвердевания металла,

$\tau_o$  - касательные напряжения трения в зоне мениска,

$q_v$  - удельный расход смеси,

$\delta_s, \varepsilon_s$  — средняя величина зазоров между коркой и рабочими стенками кристаллизатора на уровне полного затвердевания смеси и критическое значение этой величины.

Течение подаваем двумерным, ламинарным, средо-несжимаемым, а толщину слоя — много меньше радиусов кривизны приблизительно параллельных граничных поверхностей. При этом  $u_y \ll u_x$ ;  $du_x/dt \ll g$ . Давление жидкого металла из-за релаксации напряжений в корке слитка практически повсюду воспринимается рабочими стенками. Тогда система уравнения Навье-Стокса для смазочного слоя [5] запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} -\Delta p g + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) &= 0; & \Delta p &= \rho_m - \rho_c \\ \frac{\partial q_v}{\partial x} &= 0; & q_v &= \int_0^{\delta_c} u_x dy \end{aligned} \quad (1)$$

Граничные условия:  $u_x|_{y=0} = v_{kp}$ ;  $u_x|_{y=\delta_c} = v_c$ . С учетом данных [1] принимаем изменение вязкости по толщине слоя  $\eta = \eta_n \delta_c / y$ . Отсюда получаем закон распределения продольной составляющей скорости и расход смеси в сечении:

$$u_x = \frac{\Delta p g}{3\eta_n \delta_c} y^2 (y - \delta_c) + (v_c - v_{kp}) \left( \frac{y}{\delta_c} \right)^2 + v_{kp} \quad (2)$$

$$q = \frac{\Delta p g}{3\eta_n \delta_c} \delta_c^3 + \frac{v_c + 2v_{kp}}{3} \delta_c \quad (3)$$

Расход смеси димитруется средней величины зазоров на уровне полного затвердевания смеси. В зависимости от марки стали, интенсивности охлаждения, качества поверхности слитка  $\delta = (0.5 \dots 2.0) 10^{-4}$  м.

$$q = \delta_s (v_c + 2v_{kp}) / 3 \quad (4)$$

Введя обозначения  $\varepsilon_s, \alpha_c$ , подстановкой (4) в (3) и приравниванием расходов в сечениях  $x$  и  $x = 0$  получим:

$$\begin{aligned} \delta_c = \alpha_c \sqrt{\frac{\eta_n v_c (1 + 2v_{kp}/v_c)}{\Delta p g}}; & \quad \varepsilon_s = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\eta_n v_c (1 + 2v_{kp}/v_c)}{\Delta p g}}; \\ \alpha_c^3 - 12\alpha_c + 16\delta_s/\varepsilon_s \sqrt{\eta_n/\eta_n} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Величина  $\delta_s$  определяется теплофизическими параметрами лития, в частности интенсивностью охлаждения и усадки слитка. На практике ее находим из (4), зная реальный расход смеси.

Зависимость для касательных напряжений жидкостного трения в зоне

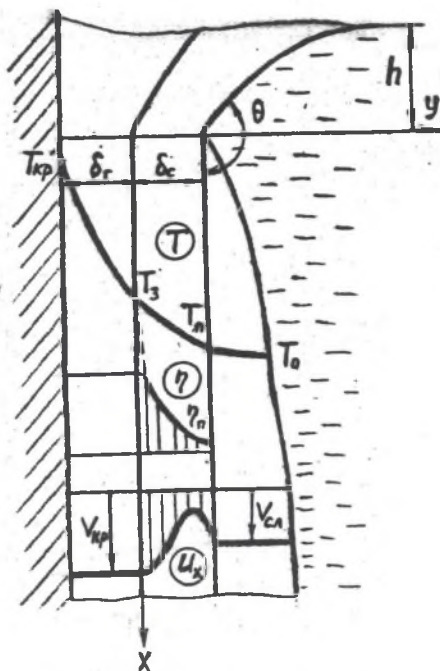


Рис. 2. Расчетная схема смазочного слоя в зоне мениска жидкого металла (с эволюцией температур  $T$ , вязкость  $\eta$ , скорость  $u_x$ );  
 $\delta_c, \delta_r$  — толщина жидкого слоя смазки и гарнисажа,  
 $h, \theta$  — высота мениска и краевого угла смачивания,  
 $v_{kr}, v_c$  — скорости движения кристаллизатора и слитка,  
 $T_s, T_0$  — температуры затвердевания смеси и металла,  
 $T_n, T_{kp}$  — температуры поверхностей слитка и рабочих стенок.

мениска  $\tau_0 = \eta_0 (\partial u_x / \partial y) |_{y=\delta_c}$  с учетом (2), (5) примет вид :

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{\Delta \rho g \eta_0 v_c}{1 + 2v_{kr}/v_c} \left( \frac{\alpha_c}{3} + 2 \frac{v_{kr}}{v} \right) + \frac{2}{\alpha_c} \left( 1 - \frac{v_{kr}}{v} \right)} \quad (6)$$

### 3. Оптимизация вязкости смеси

Из системы уравнений (5) следует, что смазочный слой стабилен лишь при соблюдении условия  $v_{kr} > v_c/2$ ;  $\delta_s < \delta_s$ .

При  $\delta_3 > \varepsilon_3$  ( $\alpha_c = 2$ ; вязкость расплава недостаточна) расход лимитируется только толщиной слоя в зоне мениска. В этом случае движение смазки и не может быть установившимся, она вытекает через зазоры и не выполняет своих функций. Смеси с большей вязкостью расплава согласно (9) образуют смазочный слой большей толщины и соответственно, с большим тепловым сопротивлением. Поэтому при большем значении  $\varepsilon_3$  реальная величина зазоров  $\delta_3$  мала. Такие смеси относятся к маллоросходным.

Для обеспечения благоприятных условия формирования корки слитка необходимо минимизировать трение в начале хода вверх ( $v_{kr} = 0$ ) [6]. Дифференцированием функции (6) по  $\eta_0$  определяем минимум, он соответствует

$\alpha_0 = \alpha_c |_{v=0} = 2$ . С учетом (5) получим оптимальную вязкость

$$\eta_0 = 2.25 \delta_3^2 \Delta \rho g / v_0 \quad (7)$$

#### 4. Выводы

Результаты математического моделирования, в частности формула оптимизации вязкости (7), хорошо согласуется с данными опытно-промышленных разливок [2-4]. Использование этих результатов позволит получить стабильный слой смазки в кристаллизаторе и минимизировать трение.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Леятец А. В.: Защита стали в процессе хеprерывной расливки. -М: Металлургия, 1984, -200с.
- [2] Nagano Y. e.a. :Tetsu to hagane, J. Iron and Steel. Inst. Jap., 1984, vol. 70., No 4, pp. 145.
- [3] Wolf M.M. e.a. :Tetsu to hagane, 1982, vol. 68, No 4, pp. 149
- [4] Шейнфельд И. И., Кукарцев Б. М.: Сталь, 1986, No 7, с. 22-24.
- [5] Емцев Б. Т.: Техническая гидродинамика. -М.: Машиностроение, 1978, с. 463.
- [6] Дюдкин Д. А., Мамяк Н. А., Левин П. А., Шукстуский И. Б.: Сталь, 1987, No 9, с. 43-45.

#### HYDRODYNAMIKA WARSTY SMARUJĄCEJ POMIĘDZY WLEWKIEM A KRYSZTAŁIZATOREM

##### Streszczenie

W pracy przedstawiono model matematyczny nieizotermicznej warstwy smarnej. Obliczono parametry warstwy i zoptymalizowano wpływ prędkości smarowania. Wyniki obliczeń analitycznych odpowiadają danym eksperymentalnym innych badaczy.

## THE HYDRODYNAMICS OF LUBRICATING LAYER BETWEEN CONTINUOUS INGOT AND MOULD

## Summary

The mathematical model of an nonisothermal lubricating layer is presented. Stability conditions of the layer and optimizing lubrication viscosity dependence on ingot drawing velocity were obtained. The results of solution corresponds to the experimental data of other researchers.