



The new, more effective crystallizer for continuous casting of ingots is presented.

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.746:536.242

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ СЛИТКОВ

При непрерывном литье слитков наибольшее распространение получил щелевой кристаллизатор. Схематично его конструкция включает в себя рубашку 1, корпус 2 с верхним 3 и нижним 4 фланцами, экран 5, перегородку 6, подводящий 7 и отводящий 8 патрубки (рис. 1). Подвод охладителя осуществляется через нижний коллектор 9 в кольцевую щель между экраном и нижним фланцем. Охлаждение рубашки происходит при вынужденной конвекции охладителя в кольцевом канале между рубашкой и экраном. Охлаждение рубашки происходит при вынужденной конвекции охладителя в кольцевом канале между рубашкой и экраном. Отвод охладителя осуществляется через кольцевую щель между экраном и верхним фланцем, далее – через верхний коллектор 10. Наиболее распространенным охладителем является вода, которая обычно подается в кристаллизатор при температуре 20–30 °С. Для оптимальной работы щелевого кристаллизатора необходимо, чтобы ширина кольцевого канала между рубашкой и экраном составляла 5 мм и скорость движения воды в канале – 4–5 м/с [1, 2]. При этом охлаждение рубашки кристаллизатора осуществляется потоком с развитой турбулентностью, поскольку число Рейнольдса (Re) 20 000–25 000. Вода, входящая в кольцевой канал, испытывает вдоль стенок рубашки 1 и экрана 2 торможение (возмущение), вследствие чего развиваются два гидродинамических пограничных слоя толщиной  $\delta$  каждый (рис. 2). В нем скорость воды меняется от 0 до скорости невозмущенного потока  $w_0$ . На начальном участке длиной  $l_{кр}$  поток охладителя по толщине динамического пограничного слоя является переменным. Величина  $l_{кр}$  при турбулентном пограничном слое составляет  $(50-100)d$ , где  $d$  – ширина кольцевого канала [3]. Следовательно, начальный участок потока охладителя в кольцевом канале до длины 250–500 мм гидродинамически нестабильный, с переменным значением  $\delta$ . Это означает, что щелевые кристаллизаторы в основном охлаждаются нестабилизированными гидродинамическими потоками. Толщину динамического пограничного слоя от его протяженности  $x$  определяем по следующему уравнению [3]:

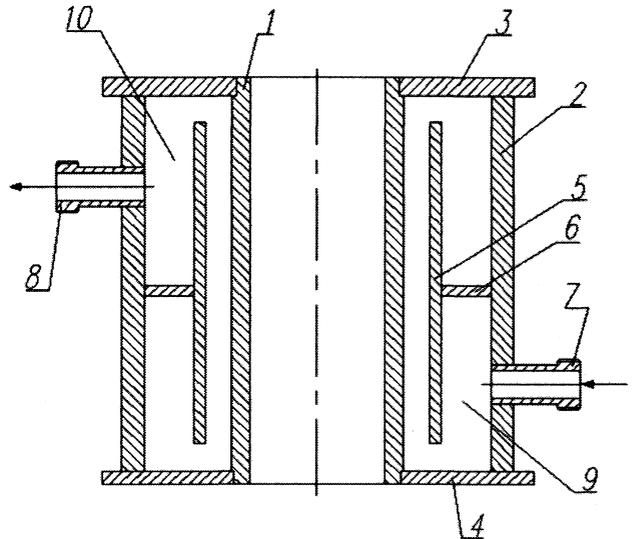


Рис. 1. Схема щелевого кристаллизатора: 1 – рубашка; 2 – корпус; 3 – верхний фланец; 4 – нижний фланец; 5 – экран; 6 – перегородка; 7 – подводящий патрубок; 8 – отводящий патрубок; 9 – нижний коллектор; 10 – верхний коллектор

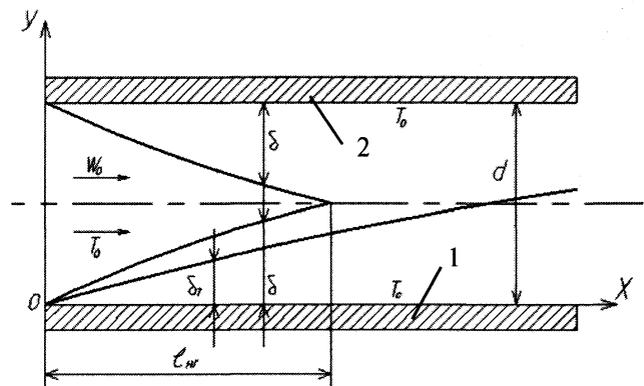


Рис. 2. Структура пограничных слоев в кольцевом канале между рубашкой и экраном щелевого кристаллизатора: 1 – рубашка; 2 – экран

ческого пограничного слоя от его протяженности  $x$  определяем по следующему уравнению [3]:

$$\delta = 0,37 \left( \frac{\nu}{w_0 x} \right)^{0,2} x, \quad (1)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость воды.

Из теории конвективного теплообмена известно, что теплопередача от нагретой рубашки кристаллизатора 1 при температуре  $T_c$  к вынужденному невозмущенному потоку с температурой  $T_0$  в отсутствие кипения будет осуществляться через тепловой пограничный слой  $\delta_T$  (рис. 2). Это расстояние, на котором температура воды меняется от  $T_c$  до значения, весьма близкого к температуре  $T_0$ . Между  $\delta$  и  $\delta_T$  существует зависимость [4]

$$\delta_T = \frac{\delta}{\sqrt{Pr}}, \quad (2)$$

где  $Pr$  — число Прандтля. Оно содержит только физические параметры воды и рассчитывается как:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$  — динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность воды.

При  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  и  $T_c = 100^\circ\text{C}$  средняя температура теплового пограничного слоя будет составлять  $60^\circ\text{C}$ , а его толщина  $\delta_T = 0,588\delta$ . Учитывая это, а также то, что в кольцевом канале щелевого кристаллизатора осуществляется односторонний теплоотвод, можно считать, что по длине рубашки он всегда будет переменным. Следовательно, таким же будет и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$ . Его можно определить из соотношения [5]:

$$\frac{\delta_T}{x} \approx \frac{1}{Nu_x}, \quad (4)$$

где  $Nu_x$  — число Нуссельта при вынужденной конвекции на расстоянии  $x$  от начала рубашки кристаллизатора. Это число характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в тепловом пограничном слое  $\delta_T$ :

$$Nu_x = \frac{\alpha_x \delta_T}{\lambda}. \quad (5)$$

Подставляя уравнение (5) в (4), получаем искомое выражение для  $\alpha_x$  с учетом уравнений (1)–(3) и  $\mu = \rho\nu$ :

$$\alpha_x \approx \frac{\rho C_p \nu^{0,6} w_0^{0,4}}{0,137 x^{0,6}}, \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность воды.

Из уравнения (6) следует, что при постоянной скорости и физических параметрах потока коэффициент теплоотдачи уменьшается по длине рубашки пропорционально  $x^{0,6}$ . Максимальная теплоотдача при охлаждении водой будет в нижней части кристаллизатора, а минимальная — в его

верхней части. Это способствует неравномерной кристаллизации отливки по высоте (длине) и приводит к короблению рубашки щелевого кристаллизатора. Если разливку жидкого металла производить сверху, то эти эффекты будут максимальны. Меньшие термические напряжения будет испытывать рубашка щелевого кристаллизатора при подаче в него расплава со стороны подвода охладителя.

Из уравнения (6) следует, что повысить охлаждающую способность щелевого кристаллизатора можно двумя способами: увеличением плотности, теплоемкости и кинематической вязкости воды и повышением ее скорости в кольцевом канале между рубашкой и экраном. Первый способ (физический) можно осуществить, добавив в воду этиленгликоль т.е., используя в качестве охладителя тосол. Второй способ (кинематический) относительно более эффективный, но при этом, чтобы повысить  $\alpha_x$  в 2 раза, нужно увеличить  $w_0$  в 5 раз. Это создает большие технические трудности по обеспечению  $Re$  на уровне 100 000–125 000. Нужны насосы очень большого давления, что экономически не выгодно.

В ИТМ НАН Беларуси разработан струйный кристаллизатор, позволяющий существенно повысить его охлаждающую способность без увеличения числа Рейнольдса [6]. Конструкция включает в себя рубашку 1, корпус 2 с верхним 3 и нижним 4 фланцами, экран 5, перегородку 6, подводящий 7 и отводящий 8 патрубки (рис. 3). В экране со стороны подвода охладителя равномерно по всей поверхности выполнены отверстия диаметром 4–5 мм с определенным, заданным шагом по высоте и образующей. При этом экран устанавливается на расстоянии 7–10 мм от рубашки кристаллизатора. Для создания большого избыточного давления в верхнем коллекторе 10 экран соединен с верхним фланцем. Между нижним фланцем и экраном остается кольцевая щель, которая совместно с шириной кольцевого канала регулирует интенсивность охлаждения нижней части рубашки кристаллизатора. Его охлаждение происходит следующим образом. Охладитель из подводящего патрубка 7 тангенциально поступает в верхний коллектор 10 и равномерно, с одинаковой скоростью продавливается через отверстия в экране 5 в виде затопленных струй. Они ударяют в наружную поверхность рубашки 1 перпендикулярно ее поверхности. При этом существенно возрастает турбулентность потока вблизи стенки рубашки и уменьшается толщина пограничного слоя. Здесь также увеличивается радиальное гидростатическое давление охладителя, что особенно важно для предотвращения его кипения и образования паровой пленки. Все это значительно повышает охлаждающую способность кристаллизатора. Определим во сколько раз охлаждающая способность струйного кристаллизатора выше обычного щелевого.

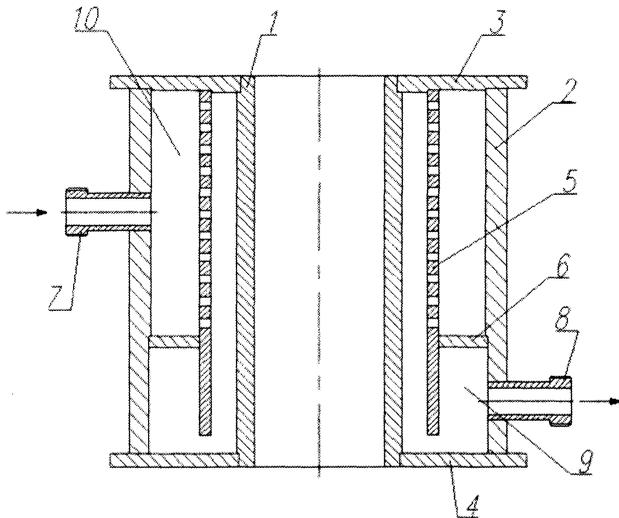


Рис. 3. Схема струйного кристаллизатора: 1 — рубашка; 2 — корпус; 3 — верхний фланец; 4 — нижний фланец; 5 — экран; 6 — перегородка; 7 — подводящий патрубкок; 8 — отводящий патрубкок; 9 — нижний коллектор; 10 — верхний коллектор

При течении капельной жидкости (воды) в каналах кольцевого поперечного сечения шелевого кристаллизатора средний коэффициент теплоотдачи ( $\overline{\alpha}_1$ ) по длине рубашки  $l$  для ее наружной поверхности можно найти по формуле Исаченко и Галина [7]

$$\overline{Nu}_1 = 0,017 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,4} \left( \frac{Pr_1}{Pr_{c1}} \right)^{0,25} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18}, \quad (7)$$

где  $\overline{Nu}_1$ ,  $Re_1$ ,  $Pr_1$  — соответственно средние числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля для потока охладителя шелевого кристаллизатора;  $Pr_{c1}$  — число Прандтля охладителя при  $T_c$ ;  $d_1$  — наружный диаметр рубашки;  $d_2$  — внутренний диаметр экрана.

Формула (7) справедлива при  $\frac{d_2}{d_1} = 1,2-1,44$ ;

$$\frac{l}{d} = 50-460; Pr = 0,7-100.$$

Если поток капельной жидкости (воды) направлен по нормали к поверхности рубашки струйного кристаллизатора, то средний коэффициент теплоотдачи ( $\overline{\alpha}_2$ ) для ее наружной поверхности при  $Re = 10^3-2 \cdot 10^5$  можно вычислить по следующей формуле [4]:

$$\overline{Nu}_2 = 0,25 Re_2^{0,6} Pr_2^{0,4} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{c2}} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где  $\overline{Nu}_2$ ,  $Re_2$ ,  $Pr_2$  — соответственно средние числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля для потока охладителя струйного кристаллизатора;  $Pr_{c2}$  — число Прандтля охладителя при  $T_c$ .

Для сравнения охлаждающей способности двух кристаллизаторов будем считать  $Re_1 = Re_2 = 20\,000$ ,  $Pr_1 = Pr_2$ ,  $Pr_{c1} = Pr_{c2}$ .

Тогда, приняв  $\frac{d_2}{d_1} = 1,2$ , разделим  $\overline{Nu}_2$  на  $\overline{Nu}_1$  и с учетом формулы (5) получим

$$\frac{\overline{\alpha}_2}{\overline{\alpha}_1} = 2 \frac{\overline{\delta}_{T1}}{\overline{\delta}_{T2}},$$

где  $\overline{\delta}_{T1}$  и  $\overline{\delta}_{T2}$  — соответственно средние толщины тепловых пограничных слоев для шелевого и струйного кристаллизаторов.

Поскольку  $\overline{\delta}_{T2} < \overline{\delta}_{T1}$ , то средний коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности рубашки струйного кристаллизатора  $\overline{\alpha}_2$  существенно (более чем в 2 раза) больше  $\overline{\alpha}_1$  для шелевого кристаллизатора. Кроме того, новая конструкция обеспечивает более равномерное охлаждение слитка, поскольку толщина теплового пограничного слоя будет в основном определяться равными, гидродинамическими параметрами каждой струи.

Применение струйного кристаллизатора позволит значительно увеличить производительность и стабильность непрерывного литья. Помимо этого, новая конструкция позволяет легко регулировать интенсивность охлаждения рубашки кристаллизатора как по высоте, так и ее периметру. Например, для непрерывного горизонтального литья необходимо, чтобы верхняя часть слитка охлаждалась более интенсивно, чем нижняя, поскольку она под действием сил тяжести прижимается к нижней стенке рубашки. Эта задача легко решается частотой размещения и различными диаметрами отверстий в экране кристаллизатора.

Таким образом, кристаллизатор со струйной системой охлаждения является наиболее эффективным при непрерывном литье слитков.

### Литература

1. Баранов О.А., Ветров Б.Г., Поль В.Б. и др. Непрерывное литье чугуна. М.: Металлургия, 1968.
2. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
3. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976.
4. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. и др. Теория теплообмена. М.: Выш. шк., 1979.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.
6. Пат. РБ №1959ц.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Металлургия, 1975.