

УДК 621.769.669

А. Н. Абраменко, А. С. Калининченко, Ю. К. Кривошеев

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КРИСТАЛЛИЗАТОРА  
ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ**

*Описана конструкция валкового кристаллизатора, состоящего из блока центробежных тепловых труб — радиальной и осевой. Приведена методика расчета конструктивных элементов, капиллярной структуры и температурного перепада системы исходя из условий обеспечения нормального протекания процессов тепло- и массообмена в зонах транспорта и фазового перехода.*

В настоящее время широкое распространение находят кристаллизаторы, работающие по принципу центробежных тепловых труб (ЦТТ). Высокая частота вращения валка позволяет достаточно эффективно осуществлять теплоотвод в воздух. На этом принципе работает устройство [1], у которого омываемые воздухом боковые наклонные стенки служат одновременно конденсаторами и теплообменниками. Для интенсификации теплосброса эти стенки снаружи оребрены. Однако их небольшая площадь ограничивает сбрасываемый тепловой поток, а следовательно, производительность устройства. Для ее увеличения был предложен кристаллизатор для непрерывного литья металлических лент, состоящий из блока ЦТТ — радиальной и осевой, причем конденсатор радиальной служит испарителем осевой ЦТТ, а конденсатор последней является одновременно охлаждаемым воздухом теплообменником [2]. Данная конструкция позволяет увеличить площадь теплосброса, а следовательно, производительность.

Кристаллизатор (рис. 1) включает вращающийся валок 1 в виде радиальной ЦТТ с испарителем 2 и конденсатором 3, который служит одновременно испарителем 4 осевой ЦТТ 5. Ее конденсатор 6 имеет снаружи ребра 7. Кристаллизатор снабжен литниковой системой 8 для подачи расплава. При работе валок 1 захватывает жидкометаллическую ленту, которая, охлаждаясь, отдает тепло кристаллизатору. За счет замкнутых испарительно-конденсационных циклов в обеих ЦТТ это тепло передается стенке конденсатора 6 и сбрасывается в воздух при вращении оребренных поверхностей 7.

Для оптимальной организации процесса фазовых переходов и транспорта элементы ЦТТ снабжены капиллярными структурами.

При разработке конструкции кристаллизатора основной задачей теплового расчета явилось определение размеров его элементов и характеристик капиллярных структур, которые обеспечивают теплопередачу номинального теплового потока, сбрасываемого в воздух при заданной частоте вращения цилиндрических стенок, имеющих определенные габариты и систему оребрения.

Исходными данными для расчета являются: наружный диаметр валка и осевой ЦТТ, максимально допустимая длина поверхностей теплоотвода, рабочая частота вращения.

Методика расчета включает следующие этапы: определение тепло-сброса вращающихся ребренных стенок в воздух; расчет производи-тельности кристаллизатора; выбор капиллярной структуры и расчет раз-меров элементов радиальной ЦТТ; выбор капиллярной структуры и расчет элементов осевой ЦТТ; расчет температурного перепада кристал-лизатора.

Вследствие многообразия размеров и форм ребрения, неоднозначно-

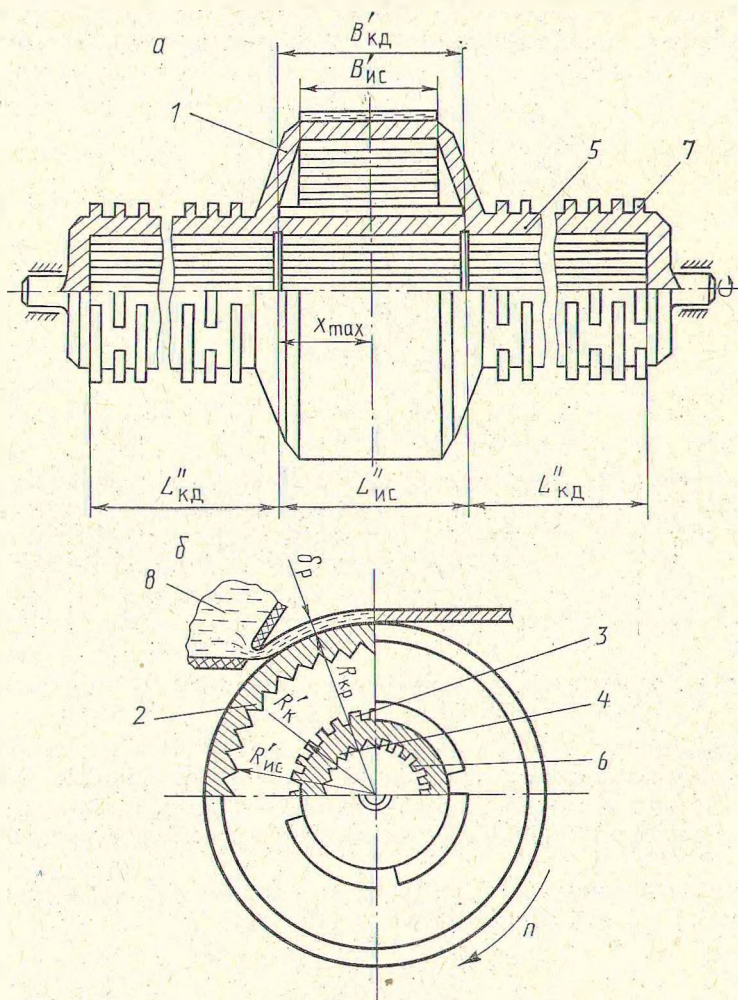


Рис. 1. Кристаллизатор для непрерывного литья металлических лент (а — фронтальный вид; б — вид сбоку)

сти влияния геометрических факторов на аэродинамику и теплообмен в настоящее время отсутствует достаточно корректная методика расчета интенсивности теплоотдачи между вращающимися ребренными стенками и воздухом. Обычно для каждого конкретного случая она определяется эмпирически. Поэтому принимаем, что трубы, имеющие заданные размеры и структуру ребрения, при рабочей частоте вращения сбрасывают в воздух номинальный тепловой поток  $Q_{ном}$ , значение которого служит основой для дальнейшего расчета кристаллизатора.

Производительность кристаллизатора определяется следующим образом. Толщина ленты расплава, формируемой на валке [3]:

$$\delta_p = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{\sigma_p \cos \theta_p}{\rho_p R_{кр}}}$$



ее ширина

$$B_p = \frac{Q_{\text{ном}}}{2\pi R_{\text{кр}} n \delta_p \rho_p (C_p \Delta T_{\text{п.р}} + kr^*)}$$

Ширина валка выбирается равной наибольшей ширине ленты:  $B_{\text{в}} = B_p$ . В итоге производительность кристаллизатора рассчитывается по формуле

$$M = B_p \sqrt{R_{\text{кр}} \rho_p \sigma_p \cos \theta_p}$$

Выбор капиллярной структуры производится исходя из критерия технологичности ее формирования. Это канавки различной формы, нарезае-

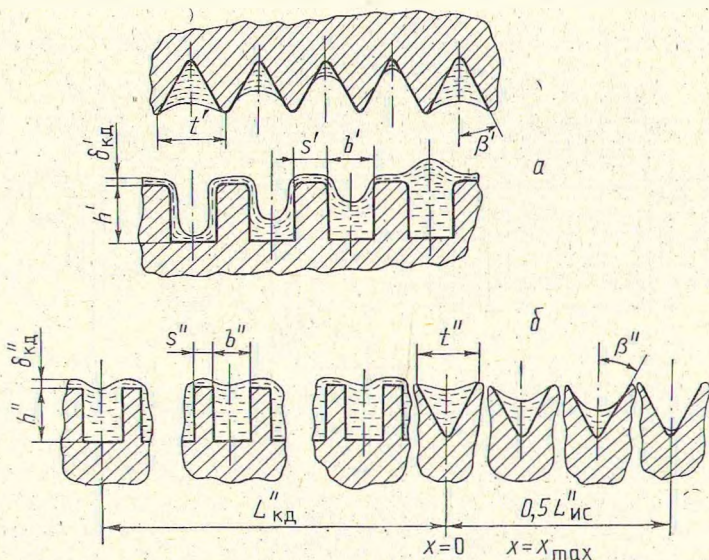


Рис. 2. Капиллярные структуры кристаллизатора: а — осевая ЦТТ; б — радиальная

мые непосредственно в стенках рабочих зон ЦТТ. В испарителе применяются канавки треугольного профиля, как обеспечивающие минимальный шаг нарезки, в конденсаторе — прямоугольного, так как процесс конденсации происходит на фронтальной части перемычек между канавками (рис. 2, а).

Объем рабочей жидкости, который необходимо испарить для снятия номинальной тепловой нагрузки:

$$W = \frac{Q_{\text{ном}}}{r' \rho_{\text{ж}} n}$$

Угол при вершине треугольных канавок испарителя рекомендуется в пределах [4]  $2\beta' = 38 \dots 40^\circ$ . Ширина канавок и их количество в испарителе:

$$t' = \frac{2W}{\pi R_{\text{ис}} B_{\text{ис}} \text{ctg } \beta'}, \quad m_{\text{ис}} \approx \frac{2\pi R_{\text{ис}}}{t'}, \quad B_{\text{ис}} = B_p$$

Упругость пара в канавках определяется по его давлению с учетом воздействия центробежных сил:

$$P_{\text{п}} = \frac{(t')^2}{4} \text{ctg } \beta' \rho_{\text{ж}} a_{\text{ц}} + P_{\text{нас}}$$

Рабочая плотность теплового потока в испарителе

$$q' = \frac{Q_{\text{ном}}}{2\pi R_{\text{ис}} B_{\text{ис}}}$$

Предельная плотность теплового потока при кипении [5]

$$q'_{\max} = \frac{\pi}{24} r' \rho_{\text{п}} \left[ \frac{\sigma_{\text{ж}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) a_{\text{ц}}}{(\rho_{\text{п}})^2} \right]^{0,25} \left[ \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}} \right]^{0,5}$$

Рабочая плотность не должна превышать предельную:  $q' \leq q'_{\max}$ . Размеры прямоугольных канавок конденсатора определяются из условия выброса из них центробежными силами капель рабочей жидкости, удерживаемых силами поверхностного натяжения, т. е. должно обеспечиваться

$$P'_{\text{кп}} \leq P'_{\text{цб}}$$

или

$$\frac{2\sigma_{\text{ж}}}{b} \leq 4\pi^2 n^2 R'_{\text{кд}} h' \rho_{\text{ж}} + 0,5\pi^3 b R'_{\text{кд}} n^2 \rho_{\text{ж}}$$

Решая это уравнение, получаем

$$b \geq \frac{-4h' \pm \sqrt{16(h')^2 + \pi K}}{\pi}$$

где

$$K = \frac{4\sigma_{\text{ж}}}{\pi^2 n^2 R'_{\text{кд}} \rho_{\text{ж}}}$$

Ширина канавки  $b$  не может превышать  $10^{-3}$  м, минимальное ее значение определяется технологическими возможностями. Максимальная глубина  $h$  лимитируется толщиной стенки, разделяющей трубы. На основании этих соображений рассчитываются размеры канавок.

Толщина пленки конденсата, удерживаемой силами поверхностного натяжения на фронтальной части перемычек между канавками, определится как

$$\delta'_{\text{кд}} = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} R'_{\text{кд}}}}$$

Коэффициент теплообмена при конденсации в поле центробежных сил рассчитывается согласно уравнению Нуссельта [6].

Величина необходимой площади конденсатора и ширина перемычки между канавками

$$s'_{\text{кд}} m'_{\text{кд}} B'_{\text{кд}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{\alpha'_{\text{кд}} \Delta T_4}$$

$$s'_{\text{кд}} = \frac{4,25 K Q_{\text{ном}}}{W \alpha'_{\text{кд}} \Delta T_4}$$

Число канавок

$$m'_{\text{кд}} = \frac{2\pi R'_{\text{кд}}}{b' + s'}$$

При расчете элементов осевой ЦТТ, как и в предыдущем случае, для испарителя выбираются треугольные капиллярные канавки, для конденсатора — прямоугольные (рис. 2, б). Длина испарителя осевой ЦТТ выбирается равной ширине конденсатора радиальной:

$$L'_{\text{ис}} = B'_{\text{кд}}$$

Угол при вершине также выбирается в пределах 38—40°. Плотность теплового потока испарителя

$$q'' = \frac{Q_{\text{ном}}}{2\pi R'' L'_{\text{ис}}}$$



Ширина треугольной канавки испарителя определяется из следующих соображений. Установлено, что при способе подачи рабочей жидкости, который имеет место в рассматриваемой конструкции, теплосъем по длине треугольной канавки испарителя имеет гиперболический характер [7]. Ввиду симметричности осевой ЦТТ рассмотрим участок испарителя  $x_{\max} = 0,5 L''_{\text{ис}}$ . Следовательно, максимальный теплосъем — в точке  $x=0$  и нулевой — в точке  $x=x_{\max}$ .

Баланс давлений в любом сечении канавки:

$$P_{\text{кп}} + P_{\text{цб}} = P_{\Gamma}, \quad (1)$$

$$P_{\text{кп}} = \int_0^{t''} \frac{2\sigma_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}} (1 - \sin \beta'')}{t^2(x) \cos \beta''} dt,$$

$$P_{\text{цб}} = \int_0^{t''} \frac{t^2(x) \operatorname{ctg} \beta'' \rho_{\text{ж}}'' a_{\text{ц}}''}{t'' x_{\max}} dt.$$

Гидравлическое сопротивление течению жидкости в канавке

$$P_{\Gamma} = \int_0^{x_{\max}} \frac{q'' x_{\max} t'' \mu_{\text{ж}}'' \ln \frac{0,01 + x_{\max}}{0,01 + x}}{r'' \rho_{\text{ж}}'' t^4(x) C_1(\beta) \ln(1 + 100x_{\max})} dx,$$

$$C_1(\beta) = \frac{\operatorname{ctg} \beta'' \cos^2 \beta''}{4(1 + \sin \beta'')^2}.$$

В результате решения получаем

$$q'' = \frac{(t'')^2 r'' \rho_{\text{ж}}'' \sigma_{\text{ж}}'' \cos \theta_{\text{ж}}'' C_2(\beta) K(\beta)}{\mu_{\text{ж}}'' x_{\max} \left[ \frac{0,01 + x_{\max}}{\ln(1 + 100x_{\max})} + 0,01 \right]} +$$

$$+ \frac{(t'')^5 a_{\text{ц}}'' \rho_{\text{ж}}'' C_1(\beta) K(\beta)}{2,3 x_{\max}^2 \mu_{\text{ж}}'' \left[ \frac{0,01 + x_{\max}}{\ln(1 + 100x_{\max})} + 0,01 \right]},$$

где

$$C_2(\beta) = \frac{\cos \beta'' \operatorname{ctg} \beta'' (1 - \sin \beta'')}{2(1 + \sin \beta'')^2};$$

$$K(\beta) = 0,0535 (2\beta'')^{1,55},$$

причем значение  $K(\beta)$  в радианах [8]. По известной величине плотности теплового потока определяется ширина треугольной канавки испарителя.

Количество канавок в осевой ЦТТ

$$m'' \approx \frac{2\pi R''}{t''}.$$

Размеры капиллярной структуры в конденсаторе выбираются из условия обеспечения транспорта такого количества рабочей жидкости, которое необходимо испарителю. Число канавок испарителя и конденсатора одинаково. Поскольку движущим мениском является искривление жидкости в последнем элементе структуры — треугольной канавке, сечение потока жидкости в прямоугольной канавке остается неизменным.

Баланс давлений в любом сечении канавки определится аналогично выражению (1):

$$P_{\text{кш}} = \frac{2\sigma_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}} (1 - \sin \beta'')}{t'' \cos \beta''}$$

$$P_{\text{пб}} = h'' \rho_{\text{ж}}'' a_{\text{ц}}'', \quad P_{\text{г}} = \int_0^{L_{\text{кд}}''} \frac{f \dot{m}'' \mu_{\text{ж}}''}{A'' D_{\text{г}}'' \rho_{\text{ж}}''} dx, \quad A = b'' h'', \quad D_{\text{г}} = \frac{2b'' h''}{b'' + h''}$$

После преобразований получим

$$\frac{b'' h''}{(b'' + h'')^2} = \frac{f \dot{m}'' \mu_{\text{ж}}'' L_{\text{кд}}''}{\rho_{\text{ж}}'' \left[ \frac{2\sigma_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}} (1 - \sin \beta'')}{t'' \cos \beta''} + h'' \rho_{\text{ж}}'' a_{\text{ц}}'' \right]} \quad (2)$$

Для решения этого уравнения дополнительно принимаем

$$f \approx 36, \quad m'' = \frac{Q_{\text{ном}}}{2t''}, \quad h'' = \frac{t''}{2} \operatorname{ctg} \beta''.$$

Ширина перемычки между канавками

$$s'' = \frac{2\pi R''}{m''} - b''.$$

Необходимое значение коэффициента конденсации

$$\alpha_{\text{кд}}'' = \frac{Q_{\text{ном}}}{2\Delta T_7 s'' m'' L_{\text{кд}}''}.$$

По величине  $\alpha_{\text{кг}}''$ , согласно уравнению Нуссельта, определяется толщина пленки конденсата. Это достигается подбором объема рабочей жидкости, заливаемой в осевую ЦТТ.

Следует указать, что при решении уравнения (2) глубины треугольной и прямоугольной канавок приняты одинаковыми. Однако в случае необходимости глубиной прямоугольной канавки можно варьировать. С целью уменьшения сопротивления переходу на границе канавок делалась круговая расточка.

Для обеспечения требуемой интенсивности теплообмена при охлаждении ленты необходимо рассчитать температурный перепад, возникающий на различных участках системы расплав—валок—окружающая среда:

$$\Sigma \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6 + \Delta T_7 + \Delta T_8 + \Delta T_9,$$

где  $\Delta T_1$  — температурный перепад контакта жидкометаллическая лента — обод кристаллизатора, получаемый решением уравнения контактно-го теплообмена;  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_3$  — температурные перепады по ободу валка и слою жидкости в канавке, рассчитываемые численным решением уравнения теплопроводности;  $\Delta T_4$  — разность температуры между паром и стенкой конденсатора в радиальной ЦТТ. Его минимальная температура определяется величиной разности давления насыщения, при которой пар вопреки воздействию центробежных сил устремляется от испарителя к конденсатору:

$$\Delta P = \frac{t'}{4} \operatorname{ctg} \beta' \rho_{\text{п}}' a_{\text{ц}}';$$

$\Delta T_5$  и  $\Delta T_6$  — температурные перепады по стенке, разделяющей трубы, и по слою жидкости в канавке испарителя осевой ЦТТ, рассчитываемые численным решением уравнения теплопроводности;  $\Delta T_7$  — разность температуры между паром и стенкой конденсатора осевой ЦТТ;  $\Delta T_8$  — температурный перепад по стенке конденсатора осевой ЦТТ, рассчитываемый



мый численным решением уравнения теплопроводности;  $\Delta T_9$  — температурный перепад между оребренной стенкой кристаллизатора и воздухом, определяемый экспериментально совместно с интенсивностью теплосброса вращающегося кристаллизатора.

Коэффициент контактного теплообмена между лентой и кристаллизатором при расчете  $\Delta T_1$  вычисляется как отношение теплопроводности воздуха к высоте микронеровностей внешней поверхности вала. Перепады по пару ввиду малости не учитываются. Температуры пара в радиальной и осевой ЦТТ соответственно равны:

$$T'_n = T_p - (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3), \quad T''_n = T'_n - (\Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6).$$

Давление насыщения в трубах определяется по температуре пара.

Разность температуры между паром и стенкой конденсатора осевой

$$\text{ЦТТ } \Delta T_7 = T''_n - (\Delta T_8 + \Delta T_9).$$

Разработанная методика расчета использована при проектировании и изготовлении устройства для получения металлических лент толщиной до  $10^{-3}$  м и шириной до 0,05 м из сложнoleгированных сплавов с улучшенными физико-механическими свойствами при повышенных температурах.

### Обозначения

$A$  — площадь,  $m^2$ ;  $a$  — ускорение,  $m/c^2$ ;  $B$  — ширина, м;  $b$  — ширина прямоугольной канавки, м;  $C$  — теплоемкость,  $Dж/(кг \cdot K)$ ;  $D$  — диаметр, м;  $f$  — коэффициент сопротивления;  $h$  — высота прямоугольной канавки, м;  $k$  — коэффициент, учитывающий соотношение времени кристаллизации на валке и в воздухе;  $L$  — длина, м;  $M$  — производительность,  $кг/с$ ;  $m$  — число канавок;  $\dot{m}$  — массовый расход жидкости,  $кг/с$ ;  $n$  — частота вращения,  $c^{-1}$ ;  $P$  — давление,  $H/m^2$ ;  $\Delta P$  — разность давления,  $H/m^2$ ;  $Q$  — тепловой поток, Вт;  $q$  — плотность теплового потока,  $Вт/m^2$ ;  $R$  — радиус, м;  $r$  — скрытая теплота парообразования,  $Dж/кг$ ;  $r^*$  — скрытая теплота кристаллизации,  $Dж/кг$ ;  $s$  — ширина перемычки между прямоугольными канавками, м;  $T$  — температура,  $K$ ;  $\Delta T$  — температурный перепад,  $K$ ;  $t$  — ширина треугольной канавки, м;  $t(x)$  — ширина слоя жидкости в любом сечении треугольной канавки, м;  $W$  — объем,  $m^3$ ;  $x$  — координата, м;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;  $\beta$  — полуугол при вершине треугольной канавки, град;  $\delta$  — толщина, м;  $\theta$  — угол смачивания, град;  $\mu$  — вязкость,  $H/(c \cdot m^2)$ ;  $\rho$  — плотность,  $кг/m^3$ ;  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $H/m$ . Индексы: ' — радиальная ЦТТ; '' — осевая ЦТТ; в — валок; г — гидравлический; ж — жидкость; ис — испаритель; кд — конденсатор; кп — капиллярный; кр — кристаллизатор; нас — насыщение; ном — номинальный; п — пар; пр — перегрев расплава; р — расплав; ц — центростремительное; цб — центробежное; max — максимальный.

### Summary

A design of the rotating roll mould of continuous casting of metal strips is described. The specific feature of this design is the joint of two centrifugal heat pipes (axial and radial) in one unit. This allows a heat release surface area to be increased. A choice of the capillary structure type is substantiated. The methods of the thermal design of a roll mould are developed. The procedures to determine mould element sizes are described.

### Литература

1. Устройство для получения металлических лент методом быстрого охлаждения из жидкого состояния. А. с. 1526892 СССР. Класс В 22D11/06.
2. Устройство для непрерывного литья металлических лент. Положительное решение № 4684818/43. А. Н. Абраменко, А. С. Калиниченко.
3. Абраменко А. Н., Калиниченко А. С., Антонец М. А., Сычиков Э. Д. // ИФЖ. 1988. Т. 55, № 1. С. 117—122.
4. Абраменко А. Н., Канончик Л. Е. // Теплообмен в криогенных устройствах. Минск, 1979. С. 14—21 (Сб. научн. тр. / ИТМО АН БССР).
5. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. М., 1969.
6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М., 1975.
7. Vasiliev L. L., Abramenko A. N. and Kanonchik L. E. // Journal AIAA. 1979. Vol. 17, N 12. P. 1395—1401.
8. Васильев Л. Л., Абраменко А. Н., Канончик Л. Е. // ИФЖ. 1980. Т. 39, № 3. С. 449—451.