

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОСЛОЙНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ДВУХВАЛКОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Башмаков Д.А., Ибрафиллов Д.И., Ибрафиллов И.Х. (НЧИ КФУ,
г. Набережные Челны, Россия)

Тел.: +7 (8552) 589538; E-mail: bashmakovda@yandex.ru

Abstract: *The paper describes the features of crystallization on a two-roll melt crystallizer to obtain a fine fraction for further recovery of precious metals. Obtained dependences of the thickness of the crystallized layer. These calculations will help in the design melt crystallizer of different materials.*

Keywords: *two-roll melt crystallizer; crystallization; thickness of the crystallized layer.*

Мировой металлургический комплекс остается в числе отраслей экономики, сохраняющих уверенную устойчивость в условиях глобального финансового кризиса. Продукция металлургии традиционно пользуется спросом. На этом фоне добыча драгоценных металлов продолжает демонстрировать высокую активность и инвестиционную привлекательность. Уровень цен на желтый металл и другие драгоценные металлы позволяет организовывать производство на ресурсах, которые раньше были бы оценены как нерентабельные.

Разработка и внедрение технологий по переработке бедных руд цветных металлов и извлечение драгметаллов из лома и отходов во всем мире становится важным направлением деятельности металлургических компаний. Это позволяет улучшать производственные показатели и продлять сроки разработки месторождений.

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей, становится оптимизация производства с целью уменьшения затрат на более глубокое извлечение драгметаллов из руды и отходов.

Особенности процесса тонкослойной кристаллизации на вальках.

С целью исключить длительную операцию охлаждения и энергозатратную операцию дробления чушки, предлагается использовать модифицированный двухвалковый кристаллизатор. В данной работе предлагается методика расчёта кристаллизатора с полным охлаждением расплава с одновременным получением мелкой фракции.

Для удобства выяснения характера процесса кристаллизации рассмотрим схему двухвалкового кристаллизатора во время работы на примере одного правого валька (рисунок 1). Режим работы второго валька будет идентичен.

В момент попадания охлаждаемой поверхности валька в зону I и контакта его с жидким расплавом, на его наружной цилиндрической поверхности начинает кристаллизоваться тонкий слой расплава, толщина которого при выходе из ёмкости-кристаллизатора достигает величины δ_1 . При выходе из ёмкости-кристаллизатора наружный слой намороженного расплава увлекает за собой тонкий слой жидкого расплава δ_2 . Толщина вынесенного слоя δ_2 , зависит от скорости вращения барабана, сил поверхностного натяжения и вязкости жидкого расплава. Таким образом, толщина кристаллизованного слоя, снимаемая с поверхности валька за один оборот, будет:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

Полный цикл вращения валька можно разделить на четыре зоны, отмеченные цифрами I, II, III и IV.

Необходимо отметить, что процесс кристаллизации жидкого расплава и охлаждения твёрдой фазы расплава толщиной δ на вальке происходит при переменной температуре стенки валька.

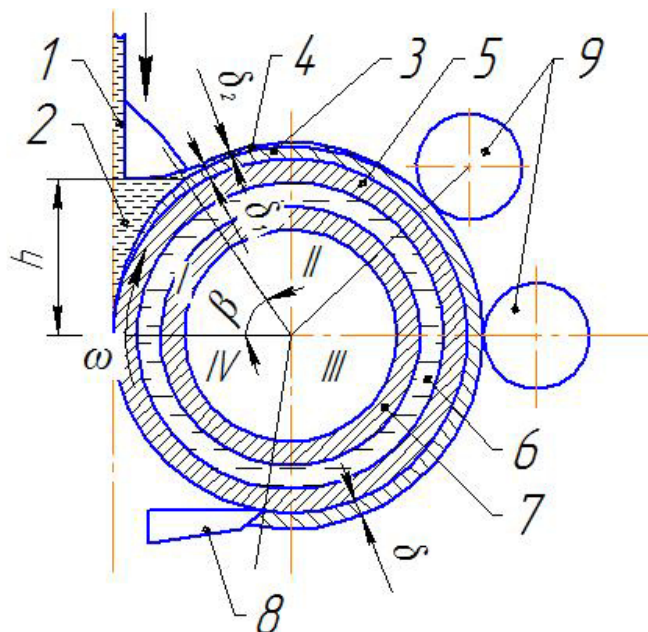


Рис. 1. Схема работы валкового кристаллизатора непрерывного действия: 1 – подача расплава, 2 – ёмкость-кристаллизатор, 3 – кристаллизованный слой, 4 – плёнка жидкого расплава, 5 – валок (барабан), 6 – охлаждающая жидкость, 7 – внутренний барабан, 8 – нож, I – первая зона охлаждения, II – вторая зона охлаждения, III – третья зона охлаждения IV – зона охлаждения валка, δ_1 – толщина кристаллизованного слоя при выходе из первой зоны, δ_2 – толщина слоя жидкого расплава при выходе из первой зоны, δ – толщина слоя охлаждённого расплава, ω – угловая скорость вращения валков, β – угол первой зоны, h – глубина ёмкости – кристаллизатора

Теплообмен при тонкослойной кристаллизации на валках.

Рассматриваемая сопряженная задача теплопроводности в системе «стенка валка – твёрдый слой» переменной толщины с конвективным теплообменом с двух сторон, решается при помощи уравнений теплопроводности для стенки валка, твёрдого слоя и с выделением теплоты фазового перехода.

Задача для стенки барабана сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T_C}{\partial t} = \alpha_{CT} \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} \text{ при } 0 \leq x \leq l;$$

где T_C – температура слоя, α_{CT} – коэффициент теплоотдачи от намерзаемого слоя к стенке валка, x – координата слоя стенки валка с началом на внутренней стенке валка, омываемой охлаждающей жидкостью, l – толщина стенки валка, t – время контакта охлаждаемой поверхности валка с расплавом.

При граничных условиях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_C}{\partial x} &= \frac{\alpha_2}{\lambda_{CT}} (T_{CT} - T_2) \text{ при } x = 0; \\ T_{CT} &= T_0(t) \text{ при } x = l; \\ T_C &= f(x) \text{ при } t = 0; \end{aligned}$$

где λ_{CT} – коэффициент теплопроводности стенки валка, α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки валка к охлаждающей жидкости, T_2 – температура охлаждающей жидкости, T_{CT} – температура наружной стенки валка.

Профиль температур твердого (намороженного) слоя расплава T_p описывается уравнением теплопроводности.

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_p}{\partial \xi^2} \text{ при } 0 \leq \xi \leq \delta_1;$$

где a_1 – коэффициент теплопроводности жидкого расплава, ξ – (координата) толщина намерзаемого слоя с началом на внешней стенке валка.

С учетом граничных и начальных условий.

$$\begin{aligned} T_p &= T_0(t) \text{ при } \xi = 0; \\ T_p &= T_{кр} \text{ при } \xi = \delta_1; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_p}{\partial \xi} - c_{кр} \rho_1 \frac{\partial \delta}{\partial t} &= \alpha_1 (T_1 - T_{кр}) \text{ при } \xi = \delta_1; \\ \delta_1 &= 0 \text{ при } t = 0; \end{aligned}$$

где $T_{кр}$ – температура кристаллизации расплава; λ_1 – коэффициент теплопроводности расплава, $c_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации расплава, ρ_1 – плотность расплава, T_1 – температура расплава, α_1 – коэффициент теплоотдачи от расплава к стенке валка.

Условиями сопряжения, являются условия равенства температур и тепловых потоков на поверхности соприкосновения стенки валка с закристаллизовавшимся слоем расплава:

$$\begin{aligned} T_C|_{x=l} &= T_p|_{\xi=0} = T_0(t); \\ \lambda_{CT} \frac{\partial T_C}{\partial x} \Big|_{x=l} &= \lambda_2 \frac{\partial T_p}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0}. \end{aligned}$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости.

Для решения поставленной неоднородной задачи теплопроводности для стенки валка применялся метод Фурье и теорема Дюамеля.

Задача намораживания слоя расплава в нашей постановке решалась многопараметрическим методом Л.Г. Лойцянского, распространённым на задачи теплопроводности с подвижной границей Е.М. Смирновым.

Аналогично решается задача о замораживании вынесенного слоя δ_2 (вторая зона), при этом в уравнения вместо коэффициента теплоотдачи к жидкому расплаву α_1 , находящемуся в ёмкости-кристаллизаторе, подставляется коэффициент теплоотдачи от вынесенной плёнки к окружающему воздуху $\alpha_{окр}$, а температура жидкого расплава T_1 , заменяется на температуру окружающей среды $T_{окр}$.

В результате решения описанных выше задач получены зависимости для определения толщины плёнки, намороженной на поверхность валка, за время его нахождения в ёмкости-кристаллизаторе [5, 6].

$$\delta_1 = 6,5 \cdot 10^{-5} \frac{\left(\lambda_P \frac{T_{кр} - T_2}{c_{кр} \rho a_P} \tau \right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\lambda_P \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{СТ}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \left(\alpha_1 \frac{T_1 - T_{кр}}{T_{кр} - T_2} \right)^{\frac{1}{6}}},$$

где $\delta_{ст}$ – толщина стенки вала.

Для расчёта вынесенной плёнки расплава δ_2 получена зависимость:

$$\delta_2 = 0,94 \left(\frac{\mu i}{\sigma} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{\mu i}{\rho g \sin \frac{\beta}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\rho}{\rho_{тв}}$$

где: μ – динамическая вязкость жидкого расплава, i – линейная скорость вращения наружной поверхности вала, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкого расплава, ρ – плотность расплава при температуре близкой к температуре кристаллизации, g – ускорение свободного падения, β – угол первой зоны, $\rho_{тв}$ – плотность намороженного расплава.

Опытные данные, проведённых экспериментов, на двухвалковом кристаллизаторе показывает хорошую корреляцию с результатами расчётов по данной формуле.

Выводы.

Данные расчеты помогут при разработке кристаллизаторов расплавов различных материалов. Будут полезны проектировщикам и исследователям при определении процесса охлаждения в работе с подобным оборудованием.

Список литературы: 1. Кристаллизация из расплавов: Справ. / Пер. с нем. И. Бартел и др. М.: Металлургия, 1987. 320 с. **2.** Гельперин Н.И., Носов Г.А. Основы техники кристаллизации расплавов. М.: Химия, 1975. 351 с. **3.** Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химической технологий. Ч. II. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с. **4.** Пат. 2101131 Российская Федерация, МПК В22D11/06. Устройство для непрерывной разливки сплава / Дынин А.Я., Мельчин С.С., Рябчиков И.В., Усманов Р.Г.; заявитель и патентообладатель Усманов Р.Г. - №97100014/02; заявл. 06.01.1997; опубл. 10.01.1998. **5.** Уонг Х. основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с. **6.** Дуб А. В., Гошкодера С. В., Ефимов С. В. и др. Исследование и управление неметаллическими включениями в низколегированной трубной стали // Черные металлы. Цветные металлы. Специальный выпуск. Октябрь. 2005. С. 30-35. **7.** Скуратов С. М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф., Термохимия, ч. 1-2, М., 1964 **8.** I.N. Israphilov, D.I. Israphilov, D.A. Bashmakov, A.T. Galiakbarov, A.D. Samigullin / Calculation of thermal processes in bottom electrode // Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, no. 1, p. 13 – 20. **9.** I.N. Israphilov, D.I. Israphilov, D.A. Bashmakov, A.T. Galiakbarov, A.D. Samigullin / Numerical analysis of temperature distribution in bottom electrode of DC arc furnace in process // Contemporary Engineering Sciences, Vol. 7, 2014, no. 26, p. 1483 – 1491. **10.** Пат. 142 995 Российская Федерация, МПК Н05В 7/06. Подовый электрод для плавки металла / Исафилов И.Х., Галиакбаров А.Т., Исафилов Д.И.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО КФУ - № 2014107020/07; заявл. 25.02.2014; опубл. 10.07.2014 Бюл. № 19.