



УДК 669.187.526:51.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ МОЛИБДЕНА

В. О. Мушегян

Созданы математическая модель и расчетная программа для определения режимов плавки молибденовых слитков в водоохлаждаемый кристаллизатор. На основе экспериментальных данных определены коэффициенты уравнений задачи теплопереноса. Модель позволяет оптимизировать процесс электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) молибдена с применением периферийного обогрева слитка в кристаллизаторе.

Mathematical model and calculation program were developed for determination of conditions of molybdenum ingots melting into a water-cooled mould. Basing on the experimental data, the coefficients of equations of heat transfer problem were determined. The model allows optimizing the process EBCHM of molybdenum by using the periphery heating of ingot in the mould.

Ключевые слова: молибден; слиток; электронно-лучевой переплав; математическая модель; теплопередача; тепловое состояние слитка

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является одним из перспективных способов получения слитков тугоплавких металлов, в частности молибдена.

Данный металлургический процесс характеризуется следующими преимуществами:

переплав проводится в вакууме, что исключает контакт металла с химически активной атмосферой, предотвращая загрязнение переплавляемого материала;

наличие развитой свободной поверхности расплава, подверженной длительной выдержке в промежуточной емкости и в кристаллизаторе, способствует протеканию процессов испарения и дегазации;

применение электронно-лучевого источника нагрева позволяет за счет сканирования поверхности лучом гибко управлять распределением теплового потока с локальным сосредоточением вблизи стенки кристаллизатора для поддержания цилиндрической

формы металлической ванны, обеспечивающей благоприятные условия формирования поверхности слитка;

равномерное распределение теплового потока в центральной части зеркала ванны для образования плоского фронта кристаллизации с заданным уровнем аксиальных градиентов температур по высоте ванны жидкого металла создает условия, при которых затвердевающий металл характеризуется высокой однородностью физических свойств [1].

В ИЭС им. Патона НАНУ проводятся работы по совершенствованию технологии ЭЛП молибдена. Анализ свойств опытных слитков показал, что при переплаве молибдена в вакууме примерно $1 \cdot 10^{-2}$ Па с применением промежуточной емкости обеспечивается снижение массовой доли примесей (таблица), а механические свойства материала улучшаются (рис. 1).

Приведенные экспериментальные данные дают количественные оценки уровня свойств, достигаемых при ЭЛП молибдена. Наряду с этим представляет интерес исследование возможностей улуч-

Химический состав слитков молибдена при ЭЛПЕ и исходного сырья [2]

Вид продукции	Массовая доля элементов, %					
	C	S	Fe	Cu	O	N
Молибден металлический в виде спеченных брикетов (TSh 64-15126592-02:2008)	0,1	0,01	0,5	0,01	1,0	—
Молибден металлический в виде спеченных брикетов (по результатам анализа)	0,005	0,001	0,2	0,01	0,2	0,03
Слитки ЭЛПЕ диаметрами 70 и 100 мм	0,002	<0,001	0,007	<0,001	0,0005	0,002

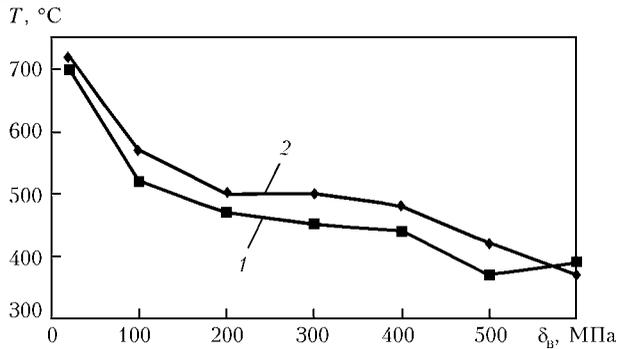


Рис. 1. Зависимость от температуры временного сопротивления молибденовых трубных заготовок, полученных из слитков различных плавок: 1 – ЭЛП; 2 – ЭЛПЕ с периферийным нагревом кристаллизатора [3]

шения качественных и количественных показателей переплавляемого материала. Наличие этой информации позволит оценить рациональный диапазон технологических параметров при ЭЛП слитков молибдена.

Получение требуемых данных ограничено необходимостью проведения дорогостоящих и трудоемких натуральных экспериментов, дающих недостаточную информацию о параметрах затвердевания переплавляемого материала.

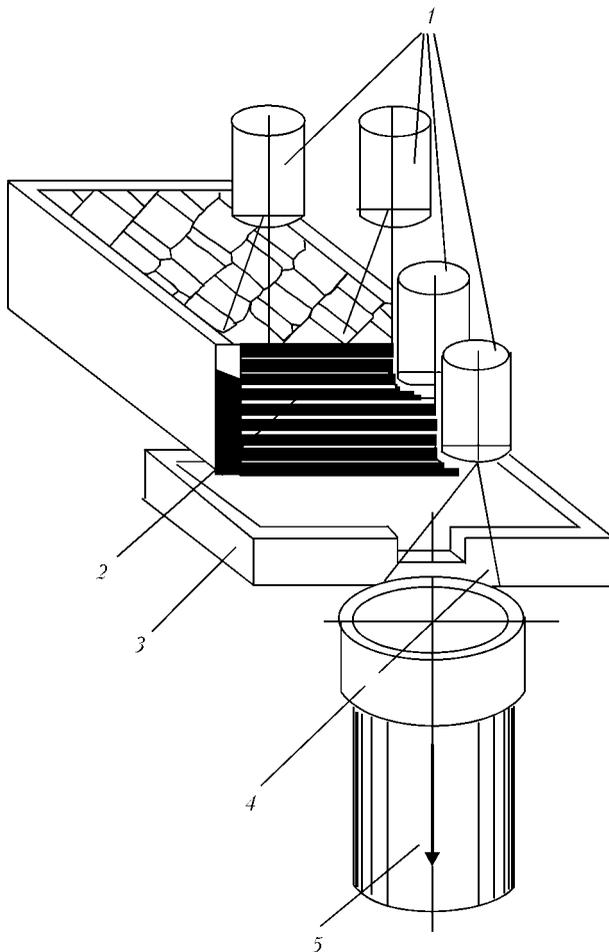


Рис. 2. Технологическая схема электронно-лучевого переплава цилиндрического слитка: 1 – электронно-лучевые нагреватели; 2 – переплавляемый металл; 3 – промежуточная емкость; 4 – кристаллизатор; 5 – затвердевший слиток

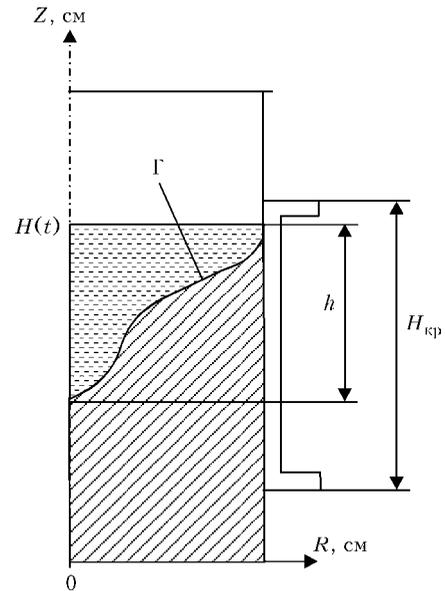


Рис. 3. Схема расчетной области: Γ – граница раздела жидкой и твердой фаз

Для оптимизации процесса получения данных рациональнее вместе использовать имеющиеся результаты экспериментов и возможности методов математического моделирования физических процессов, протекающих при ЭЛП молибдена.

В связи с этим основной задачей данной статьи заключалась в формулировке математической модели, позволяющей исследовать процессы теплообмена и затвердевания при ЭЛП молибдена, оценить количественные и качественные показатели как параметров режима переплава, так и условий затвердевания переплавляемого материала.

Технологическая схема ЭЛП цилиндрического слитка с использованием промежуточной емкости представлена на рис. 2.

Формулировка математической модели затвердевания металла в цилиндрическом кристаллизаторе предполагает осевую симметрию тепловых процессов, в связи с чем трехмерная задача была сведена к решению двумерной в цилиндрических координатах (рис. 3).

С учетом принятых допущений осевой симметрии теплового поля тепловое состояние слитка при ЭЛП молибдена описывается следующим уравнением [4]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $W = W(T)$ – энтальпия; $\lambda(T)$ – эффективный коэффициент теплопроводности, приближенно учитывающий конвективный перенос тепла в жидкой ванне металла.

Коэффициент $\lambda(T)$ может быть задан следующей зависимостью [5]:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda(T), & T \leq T_L; \\ \lambda(T^*) K_\lambda, & T > T_L, \end{cases} \quad (2)$$

где T_L – температура плавления материала; T^* – верхний предел температуры табличных значений



$\lambda(T)$; K_λ — эмпирический коэффициент (назначается исходя из имеющихся экспериментальных данных).

Уравнение (1) интегрируется в двухмерной области $\Omega = \{0 < r < R, 0 < z < H(t)\}$, $t \in [0, t^*]$ (рис. 3). Высоту слитка $H(t)$ увеличивали дискретно, в соответствии с параметрами порционной заливки жидкого металла из промежуточной емкости — на зеркало ванны периодически добавляли изотермический слой металла с заданной температурой заливки.

Сформулируем граничные условия для краевой задачи (1). На внешней боковой поверхности слитка теплообмен с проходным кристаллизатором и стенками вакуумной камеры описывается выражением, учитывающим контактный теплообмен затвердевающего материала, частично прилегающего к стенке кристаллизатора, который по мере нарастания затвердевающей корки металла переходит в теплообмен по закону Стефана–Больцмана

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \bar{\alpha}(T)(T - T_{out}), \quad (3)$$

где $\bar{\alpha}(T)$ — эффективный коэффициент теплопередачи от поверхности слитка к внешней среде с температурой T_{out} (в качестве T_{out} могут выступать температура T_{out}^w охлаждающей воды в кристаллизаторе либо температура стенок вакуумной камеры T_{out}^c):

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}(T) &= \left(\frac{1}{\alpha_C(T)} + \frac{\delta_C}{\lambda_C} + \frac{1}{\alpha_W} \right)^{-1}; \\ \alpha_C(T) &= \alpha_{IC}(1 - Q) + \alpha_{St}(T)Q; \\ \alpha_{St}(T) &= \varepsilon \sigma_0 (\bar{T} + \bar{T}_{out})(T^2 + T_{out}^2); \\ Q &= \begin{cases} 1, & T \geq T_L; \\ (T - T_1)/(T_L - T_1), & T_L > T > T_1; \\ 0, & T \leq T_1. \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь α_{IC} — коэффициент контактного теплообмена между затвердевающим металлом и стенкой кристаллизатора; $\alpha_{St}(T)$ — коэффициент лучистого теплообмена по закону Стефана–Больцмана между затвердевающим металлом и стенкой кристаллизатора; \bar{T} , \bar{T}_{out} — абсолютные температуры поверхности слитка и внешней среды; $T_1 = 0,8T_L$ — температура полного отрыва поверхности слитка от стенки кристаллизатора; ε — приведенная степень черноты поверхностей теплообмена;

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right)^{-1}, \quad (4)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$; S_1, S_2 — соответственно степень черноты и площади поверхностей теплообмена; σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана; δ_C, λ_C — соответственно толщина и коэффициент теплопроводности стенки кристаллизатора; α_W — коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки кристаллизатора к охлаждающей воде.

За пределами кристаллизатора полагается, что δ_1 составляет нулевую величину, а α_W — бесконечно большую, по сравнению с $\alpha_{St}(T)$.

На донной поверхности слитка граничные условия описываются по аналогии с уравнениями (3), (4).

На свободной поверхности зеркала металлической ванны результирующий тепловой поток выражается соотношением

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H(t)} = \alpha_{St}(T)(T - T_{uot}) + q_h(r, t), \quad (5)$$

где $q_h(r, t)$ — удельная плотность теплового потока электронно-лучевого нагрева зеркала ванны.

В начальный момент времени предполагается наличие в полости кристаллизатора затравочного объема металла с заданной температурой $T_0 = T_L$. Расчет проводится до достижения заданной высоты слитка, соответствующей приблизительно двум его диаметрам, при которой формируется установившееся тепловое состояние жидкометаллической ванны.

Для численной реализации математической модели ЭЛП молибдена использовался метод конечных разностей [6].

В справочнике [7] приведены исходные значения физических характеристик и технологических параметров, входящих в описание математической модели формирования слитка молибдена при ЭЛП.

Сопоставление результатов, полученных в ходе расчетов при использовании контрольных ключевых параметров, с данными натурных экспериментов на реальном технологическом объекте позволяет провести верификацию модели [8] и определить осредненные характеристики параметров процесса, которые не удается получить непосредственными измерениями на основе косвенной информации.

Заданные технологические параметры плавки

Диаметр слитка D , см	70	100
Перегрев заливаемого металла над $T_L \Delta T$, °C	50	
Необходимая высота цилиндрической части жикометаллической ванны Δh_r , см	0,2	
Высота кристаллизатора H_C , см	15	
Конечная высота слитка Z , см	150	

Контрольные данные опытных плавов ЭЛП молибдена, использованные для определения недостающей информации о коэффициентах теплообмена боковой поверхности слитка с кристаллизатором, стенками вакуумной камеры, поддоном, а также зеркала металлической ванны со стенками вакуумной камеры следующие.

Заданные контрольные значения технологических параметров плавки

Диаметр слитка D , см	7	10
Высота порции заливаемого металла Δh_z , см	4,5	3,5
Продолжительность паузы между заливками Δt_z , мин	2	
Тепловая мощность центрального обогрева W_1 , кВт	20	40
Тепловая мощность периферийного обогрева вблизи кристаллизатора W_2 , кВт	40	40
Соотношение радиусов центрального и периферийного обогрева r_{W_1}/R	0,8	0,7

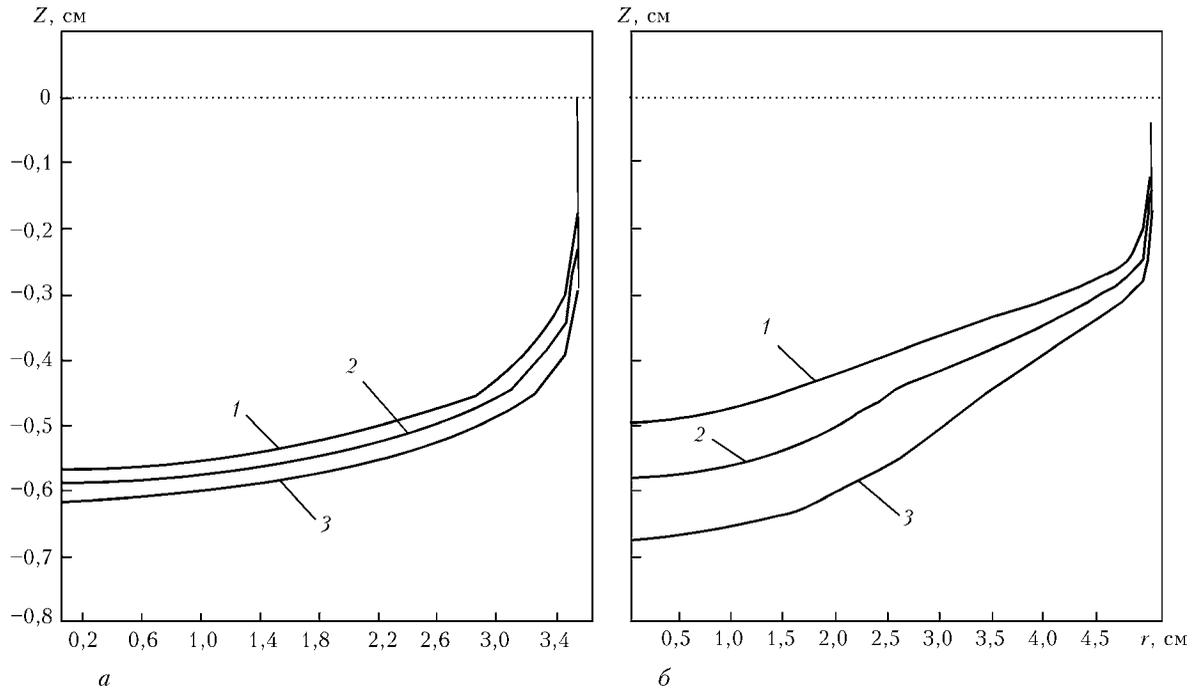


Рис. 4. Тепловое состояние головной части слитка ЭЛП молибдена при установившейся геометрии жидкометаллической ванны (диаметр слитка 7 (а) и 100 см (б), °С: 1 – 2630; 2 – 2617; 3 – 2600

Заданные контрольные условия затвердевания слитка

Диаметр слитка D , см	7	10
Глубина ванны на оси слитка ($h_{r=0}$), см	0,6	0,6
Высота цилиндрической части ванны ($h_{r=R}$), см	0,2	0,2

На рис. 4 приведено рассчитанное тепловое состояние слитка ЭЛП молибдена при установившейся геометрии жидкометаллической ванны.

Осредненные значения черноты поверхностей подбирались таким образом, чтобы рассчитанные значения кинетики температуры контрольных точек минимально отличались от экспериментальных.

Расчеты показали, что при заданных контрольных параметрах переплава и данных о замере температур на внутренней поверхности кристаллизатора и на поверхности поддона с помощью вольфрам-ренийевых термопар, подключенных к регистрирующему устройству КСП-4; на поверхности жидкой ванны с помощью оптического пиromетра ППТ-131 «Смотрич») в контрольных точках, осредненные значения коэффициентов имеют следующие значения.

Рассчитанные данные

Диаметр слитка D , см	7	10
Приведенный коэффициент черноты поверхности на зеркале ванны ϵ_1	0,4	
Эффективный коэффициент частичного контактного теплообмена на боковой поверхности слитка в верхней зоне кристаллизатора в цилиндрической части металлической ванны, α_C , Вт/см ² ·°С	0,2	
Приведенный коэффициент черноты на внешней боковой поверхности слитка в пределах кристаллизатора в зоне полного отрыва от стенки кристаллизатора ϵ_C	0,8	
Приведенный коэффициент черноты на внешней боковой поверхности слитка ниже кристаллизатора ϵ_S	0,5	
Эффективный коэффициент теплообмена на донной поверхности слитка α_B Вт/см ² ·°С	0,01	

Идентифицированные данные будут использоваться для дальнейших расчетов и оптимизации кинетики теплового состояния слитка молибдена при ЭЛП.

Выводы

1. Разработана и программно реализована математическая модель электронно-лучевой плавки молибдена в медный водоохлаждаемый кристаллизатор.
2. На примере экспериментальных плавков слитков молибдена диаметром 7 и 10 см доказана адекватность математической модели, установлены эмпирические коэффициенты основных уравнений решаемой задачи.

1. Флеммингс М. Процессы затвердевания в вакууме. — М.: Мир, 1977. — 423 с.
2. Мушегян В. О. Электронно-лучевая плавка восстановленного концентрата молибдена // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 4. — С. 26–28.
3. Мушегян В. О. Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью — эффективный способ повышения механических свойств молибдена // Электрометаллургия. — 2010. — № 9. — С. 28–31.
4. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1966. — 267 с.
5. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
7. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
8. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. — М.: Наука, 1989. — 608 с.

ГП НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 20.07.2011