



УДК 669.187.526.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ПЕРЕПЛАВЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. Б. Лесной, В. Ф. Демченко

Проведено численное моделирование процессов тепломассообмена и гидродинамики при затвердевании слитка электронно-лучевого перепада. Модель базируется на сопряженном решении уравнений конвективного тепломассопереноса и гидродинамики. Учитывается движение расплава под воздействием термокапиллярных и гравитационных сил, возникающих при наличии градиентов температур и концентраций в металлической ванне. Проанализированы факторы и установлены закономерности формирования химической неоднородности в жидком и затвердевающем металле.

Numerical modeling of processes of heat-mass exchange and hydrodynamics in solidification of ingots of electron beam remelting was made. The model is based on conjugate solution of equations of convective heat-mass transfer and hydrodynamics. The melt motion under the action of thermocapillary and gravitational forces occurring at the presence of gradients of temperatures and concentrations in metal pool is taken into consideration. Factors are analyzed and regularities of formation of chemical non-homogeneity in molten and solidifying metal are established.

Ключевые слова: электронно-лучевой перепад; численное моделирование; тепловые, гидродинамические, массообменные процессы; испарение; химическая неоднородность; кристаллизация слитка ЭЛП

В технологических процессах выплавки слитков способами специальной электрометаллургии, при сварке плавлением и в других родственных технологиях, связанных с плавлением и кристаллизацией металла, определяющее влияние на формирование химической неоднородности в затвердевающем металле оказывает динамика движения расплава. Практически для всех указанных случаев значения массового и температурного числа Пекле значительно превосходят единицу, что свидетельствует о преимущественном влиянии конвективных потоков на тепломассообмен в расплаве.

Несмотря на понимание важной роли гидродинамического фактора в достижении требуемых технологических результатов, исследования конвекции металлической ванны носят в настоящее время весьма ограниченный и, в определенной степени, поверхностный характер. Такое состояние вопроса, прежде всего, связано с большими экспериментальными трудностями, обусловленными высокими температурами, агрессивностью среды, непрозрачностью расплава, малыми объемами ванны (при сварке) и другими факторами. В связи с этим значительное развитие получили методы математического моделирования процессов затвердевания, которые позволяют сократить дорогостоящие натурные эксперименты, в особенности на начальных этапах отработки технологий и проектирования оборудования [1].

Имеющиеся работы по математическому моделированию массообменных процессов при электрон-

но-лучевом перепаде (ЭЛП) можно условно разделить на две группы. К первой относятся модели с сосредоточенными параметрами, базирующиеся на уравнениях интегрального баланса массы [2, 3]. Как правило, в этих работах используется априорный коэффициент массообмена приповерхностных слоев зеркала ванны с идеально перемешиваемым ядром расплава, который фактически определяет диффузионное сопротивление гидродинамического погранслоя и интенсивность массообменных процессов. Ограниченность этих моделей не позволяет использовать их для исследования нестационарных процессов испарения при существенно неравномерном электронно-лучевом нагреве поверхности зеркала ванны, который наиболее характерен для большинства технологических схем ЭЛП. Во вторую группу выделим математические модели с непосредственным расчетом конвективно-диффузионного массопереноса в жидком металле, учитывающие неравномерность удельных потоков испарения в зависимости от температуры и концентрации компонентов расплава вблизи поверхности зеркала ванны. В качестве характерных представителей этой группы рассмотрим модели [4–7], в которых расчет массообменных процессов состоит из двух частей. В первой части рассчитывается термическая модель в переходном режиме [5], которая используется для определения теплового состояния слитка. Во второй — модель взаимного переноса вещества, тепловой энергии и импульса в ванне металла. Особенность вычислений такова, что моделирование массообменных процессов проводится в «закрепленной» ванне металла, форма которой получена на основе результатов первой термической модели. Аналогичные подходы были использованы для рас-

© А. Б. ЛЕСНОЙ, В. Ф. ДЕМЧЕНКО, 2003

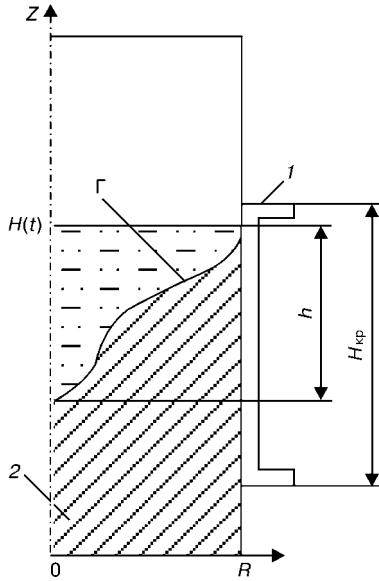


Рис. 1. Схема математической модели формирования слитка ЭЛП круглого сечения: 1 — кристаллизатор; 2 — затвердевший слиток; $H(t)$ — текущая высота слитка; Γ — фронт затвердевания; h — глубина ванны; $H_{кр}$ — высота кристаллизатора

чета гидродинамических процессов в слитках вакуумно-дугового переплава [6, 7]. Использование такого приближения с целью снижения объема вычислений в определенной степени оправдано тем, что при достижении слитком высоты, соизмеримой с двумя диаметрами кристаллизатора, тепловой режим слитка близок к квазистационарному [1] и форма ванны с течением времени практически не меняется. С другой стороны, решение задач тепло- и массообмена отдельно от гидродинамической неизбежно приводит к искажению полученного решения, поскольку теряется взаимосвязь процессов переноса тепла, массы и импульса. Наиболее существенным недостатком «статической» ванны является отсутствие возможности прогнозировать химическую неоднородность в формирующейся твердой фазе. В то же время прогнозирующие оценки процессов массопереноса при электронно-лучевом переплаве представляют интерес по нескольким причинам. Во первых, необходимы количественные оценки кинетики испарения легирующих элементов, особенно с высокой упругостью пара, для компенсации их угара. Во вторых, необходимо иметь качественное представление о закономерностях формирования химической неоднородности в жидком и затвердевающем металле. В третьих, желательно иметь возможность получить представление о характере распределения как легирующих, так и примесных элементов в произвольном сечении слитка для определения выхода годного металла, соответствующего техническим требованиям.

В настоящей статье, в отличие от рассмотренных ранее работ, предлагается компьютерная модель сопряженных процессов тепломассообмена и гидродинамики, которая позволяет проследить кинетику формирования теплового и концентрационного состояния слитка в жидком и затвердевшем металле при ЭЛП с промежуточной емкостью титановых сплавов с повышенным содержанием алюминия (ВТ6, ВТ20), начиная с заливки первой порции металла до достижения квазистационарного состояния в слитке.

Математическая модель теплообмена и гидродинамики [8] была дополнена уравнениями конвективной диффузии. Отметим основные положения расширенной модели. Предполагается осевая симметрия тепловых, концентрационных и гидродинамических полей в слитке. В связи с этим трехмерная задача была сведена к решению двумерной в цилиндрических координатах (рис. 1). Расчет тепло-массообменных процессов учитывает конвективно-кондуктивный, конвективно-диффузионный механизм переноса тепловой энергии и массы, а также турбулентный характер движения расплава. Задача гидродинамики решается на базе полной системы уравнений Навье–Стокса в приближении Обербека–Буссинеска. Учитываются следующие факторы, приводящие к движению жидкого металла: во первых, объемная гравитационная конвекция, возникающая в поле силы тяжести при наличии градиентов температур и концентраций в расплаве; во вторых, учитывается поверхностная термокапиллярная конвекция Марангони, возникающая вследствие изменения сил поверхностного натяжения при неравномерном нагреве свободной поверхности зеркала ванны.

Процессы массопереноса в многокомпонентном расплаве описываются уравнением конвективной диффузии

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\nabla \nabla) C_i = \text{div} (D_i^{(0)}(T) \nabla C_i); \quad (1)$$

$$\Omega = \{ 0 < r < R, 0 < z < H(t) \}, \quad t \in [0, t^*],$$

где C_i — концентрация i -го компонента; ∇ — вектор скорости; $D_i^{(0)}(T) = D_i + \frac{L}{2} |\nabla|$ — коэффициент диффузии, учитывающий турбулентный характер переноса i -го вещества; L — средний масштаб турбулентных вихрей, по которым происходит усреднение. Для расчета коэффициента диффузии D_i используется температурная зависимость

$$D_i = D_i^{(0)} \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right), \quad (2)$$

где ΔE — энергия активации, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $D_i^{(0)}$ — предэкспоненциальный множитель, см²/с.

Изменение высоты слитка в модели может учитываться несколькими способами: дискретно — слив металла порциями из промежуточной емкости, непрерывно — аксиальный переплав и комбинацией дискретного и непрерывного ввода металла.

На фронте затвердевания предполагается выполнение условий сопряжения удельных потоков массы ликвирующего элемента:

$$\begin{cases} D_i^{(L)} \frac{\partial C_i^{(L)}}{\partial n} \Big|_r - D_i^{(S)} \frac{\partial C_i^{(S)}}{\partial n} \Big|_r = v_n (C_i^{(S)} - C_i^{(L)}) \\ C_i^{(S)} \Big|_r = K_i C_i^{(L)} \Big|_r, \end{cases} \quad (3)$$

где v_n — проекция вектора скорости затвердевания на нормаль к межфазной границе; K_i — равновесный коэффициент распределения i -го элемента; индексы S, L соответствуют твердой и жидкой фазам.



Граничные условия были сформулированы следующим образом. На оси, боковой и донной поверхностях слитка массообмен отсутствует:

$$\frac{\partial C_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial C_i}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (4)$$

На зеркале ванны условия локального баланса массы учитывают: поступление переплавляемого металла в кристаллизатор с исходной концентрацией $C_i^{(0)}$; удельный поток массы легирующего элемента, поступающий из глубины расплава за счет конвективно-диффузионного механизма, и потери за счет испарения:

$$\rho D_i \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=H(t)} = v_i^{(м\text{ак})} + v_i^{(исп)}, \quad (5)$$

откуда

$$v_i^{(м\text{ак})} = m(r) \rho \left(C_i \Big|_{z=H(t)} - C_i^{(0)} \right) v_z(r, t) \Big|_{z=H(t)}, \quad (6)$$

где ρ — удельная плотность расплава; $v_i^{(м\text{ак})}$ — удельный массовый поток, связанный с поступлением переплавляемого металла в кристаллизатор с исходной концентрацией растворенного вещества $C_i^{(0)}$ и скоростью $v_z(r, t) \Big|_{z=H(t)}$; $m(r)$ — поверхностная плотность распределения капель (зависит от специфики переплава); $v_i^{(исп)}$ — удельный массовый поток, связанный с испарением растворенного вещества. Модель испарения базируется на законе Ленгмюра. В работе [9], оперирующей кинетическим уравнением Больцмана, показано, что в условиях технологического вакуума ЭЛП 1... 0,1 Па это соотношение позволяет адекватно рассчитывать локальные скорости испарения:

$$v_i^{(исп)} = \frac{\alpha \gamma_i P_i^0 C_i \Big|_{z=H(t)}}{\sqrt{2\pi R M_i T} \Big|_{z=H(t)}}, \quad (7)$$

где α — коэффициент аккомодации; M_i — молярная масса; γ_i — коэффициент активности вещества в растворе; P_i^0 — давление насыщенного пара чистого компонента. Здесь

$$P_i^0 = A_i \exp \left(- \frac{B_i}{T \Big|_{z=H(t)}} \right), \quad (8)$$

где A_i, B_i — константы.

В начальный момент времени $t = 0$ предполагается существование затравочного объема жидкого металла высотой $H(0)$ с однородным концентрационным полем $C_i(r, z, 0) = C_i^0 = \text{const}$.

Для численной реализации комплексной сопряженной модели тепломассообмена и гидродинамики применяется совместный лагранжево-эйлеровый метод [10], использующий аппроксимацию на локальных лагранжевых сетках конвективных членов в уравнениях переноса вместе с субстанциональными производными. Этот метод за счет минимизации эффектов счетной диссипации обеспечивает приемлемую точность численного решения [11] на достаточно грубых пространственных и временных сетках. Задача рассчитывалась в естественных переменных с использованием схем расщепления урав-

нений по физическим подпроцессам. Программное обеспечение, разработанное в среде Compaq Visual Fortran 6.5, позволяет проводить расчеты полного временного цикла формирования слитка ЭЛП (начиная с заливки первой порции, вывода усадочной раковины и охлаждения поверхности слитка до заданной температуры) на персональных компьютерах.

Рассмотрим факторы, обуславливающие формирование химической неоднородности в металлической ванне: во первых, периодическое поступление из промежуточной емкости жидкого металла исходной концентрации; во вторых, технологическая специфика ЭЛП такова, что вблизи стенки кристаллизатора свободная поверхность расплава должна более интенсивно обогреваться для поддержания цилиндрической части жидкой ванны. В этих условиях неравномерность теплового потока приводит к неравномерности испарения легирующих и примесных компонентов расплава и соответственно к формированию химической неоднородности в жидкой фазе; в третьих, сложный характер направленного конвективного массопереноса в объеме расплава под воздействием гравитационных и термокапиллярных сил.

Расчеты проводились для выплавки титанового сплава ВТ6 со следующими технологическими параметрами: диаметр кристаллизатора 40 см, массовая производительность переплава 50 г/с, общая мощность электронно-лучевого обогрева 65... 70 кВт, продолжительность накопления жидкого металла в промежуточной емкости 120 с, содержание алюминия в расплаве, поступающем в кристаллизатор, 7%, равновесный коэффициент распределения алюминия на фронте затвердевания близок к 1. При расчетах использовалась наиболее широко применяющаяся в действующих технологиях ЭЛП схема распределения теплового потока электронно-лучевого обогрева — равномерный для центральной зоны зеркала ванны и с максимальным сосредоточением только вблизи стенки кристаллизатора (рис. 2, а).

В этих условиях в объеме жидкого металла формируется интенсивное вихревое течение, локализованное вблизи стенки кристаллизатора в верхней части металлической ванны, в то время как центральные объемы ванны перемешиваются незначительно (рис. 3, б). Это обстоятельство приводит к равномерному испарению алюминия с центральной части зеркала ванны (рис. 2, б).

В зоне повышенного тепловложения формируется наибольший перегрев металла над температурой ликвидус — в 4 раза выше, чем в центральной части ванны (рис. 2, в), который обуславливает увеличение потерь легкоиспаряющихся компонентов в 1,5 раза, что в свою очередь влечет за собой формирование химической неоднородности в жидком металле вблизи поверхности испарения. В зоне повышенного тепловложения $0,7 < r < 1,0 R$ в приповерхностной части ванны формируются объемы расплава наиболее обедненные алюминием (рис. 4).

Конвективными потоками обедненный металл транспортируется по двум направлениям: вдоль свободной поверхности от периферии к оси слитка и в виде нисходящего потока вдоль фронта затвердевания, при этом расплав с более высоким содержанием алюминия оттесняется в центральные объемы ван-

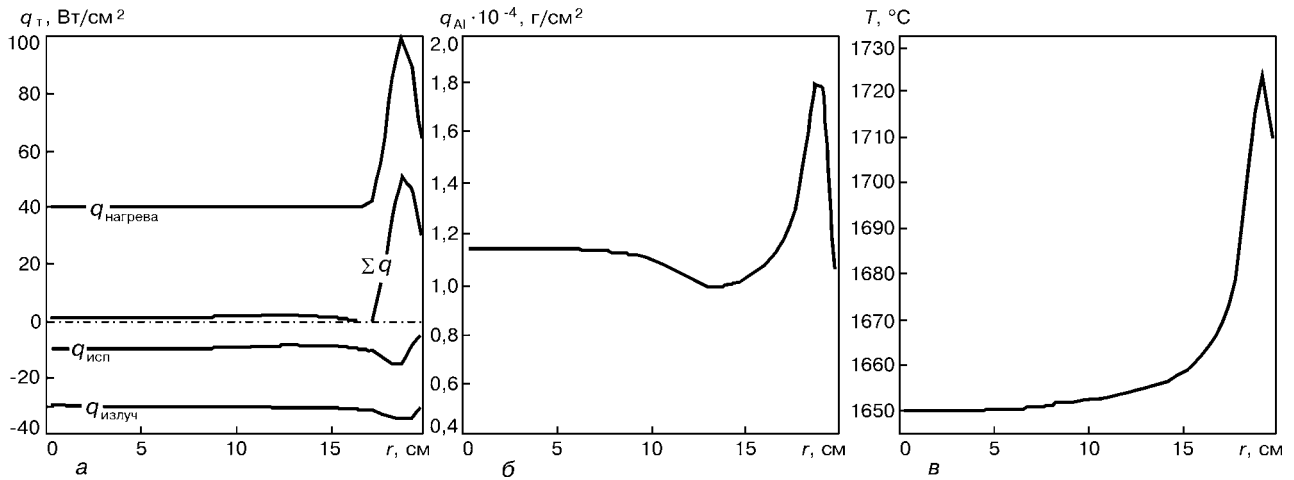


Рис. 2. Удельные тепловые потоки (а), удельные потоки испарения алюминия (б) и температуры поверхности ванны (в)

ны. В результате этого химический состав жидкого металла становится неоднородным как в радиальном, так и в осевом направлениях (рис. 4, 5). Следует подчеркнуть, что нисходящий конвективный поток вдоль фронта затвердевания (рис. 3, б, 4) определяет основной механизм образования химической неоднородности вдоль радиуса затвердевающего слитка. В то время, как конвективный поток расплава вдоль свободной поверхности препятствует массопереносу более обогащенного алюминием расплава из ядра к зеркалу ванны, уменьшая испарение легирующего компонента, чем и обусловлен прогиб кривой на рис. 2, б.

Расчеты показывают (рис. 3, а), что наименее благоприятные условия для формирования химической однородности вдоль оси слитка складываются

на переходных этапах начала и завершения переплава. Периодическое поступление жидкого металла из промежуточной емкости с более высоким содержанием алюминия, чем в металлической ванне, в затвердевшем металле проявляется в виде незначительных скачков концентрации только вблизи боковой поверхности слитка $0,95 < r < 1,0 R$. Центральная же часть слитка характеризуется достаточно высокой однородностью как по высоте, так и по радиусу.

Выводы

1. Разработана математическая модель для расчета нестационарных процессов теплообмена и гидродинамики, протекающих при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов с повышенным

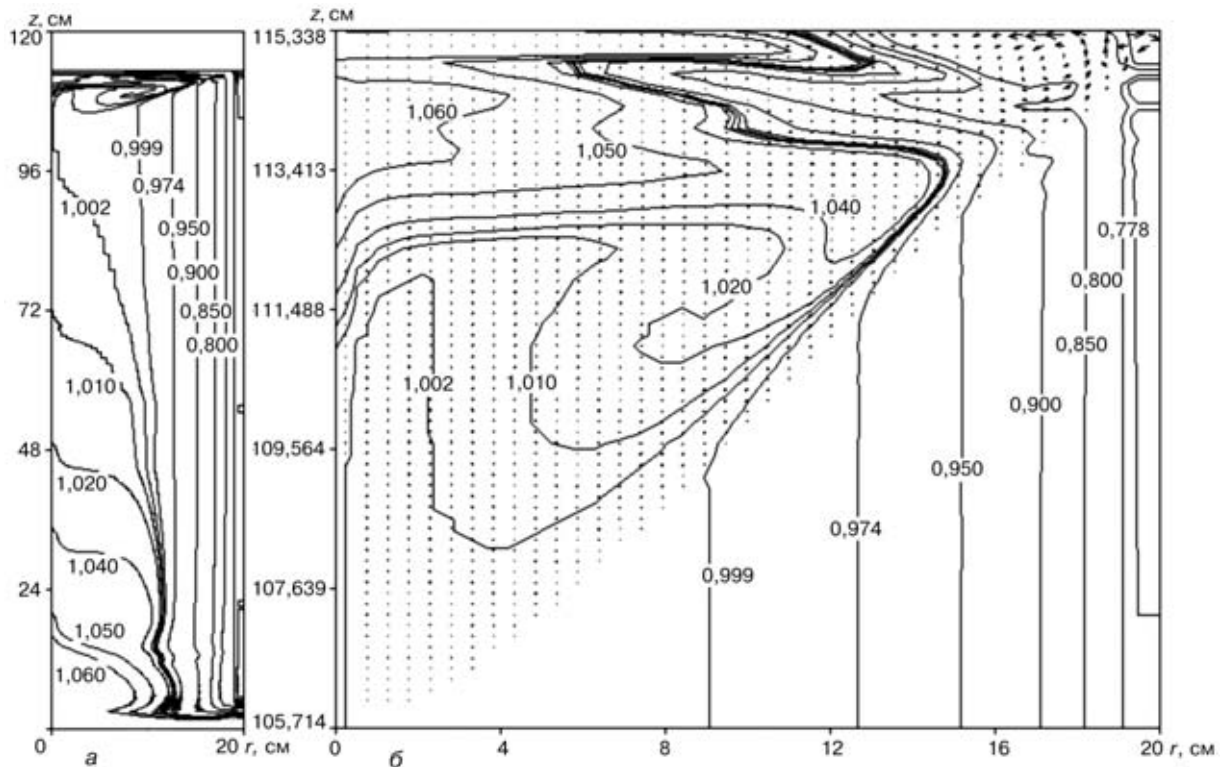


Рис. 3. Относительное распределение алюминия (C_{Al}/C_{Al}^x) в затвердевшем слитке (а), в металлической ванне (б) и гидродинамика расплава при равномерном подогреве центральной части свободной поверхности расплава ($C_{Al}^x = 6,6\%$ — характерная концентрация алюминия в затвердевшем металле)

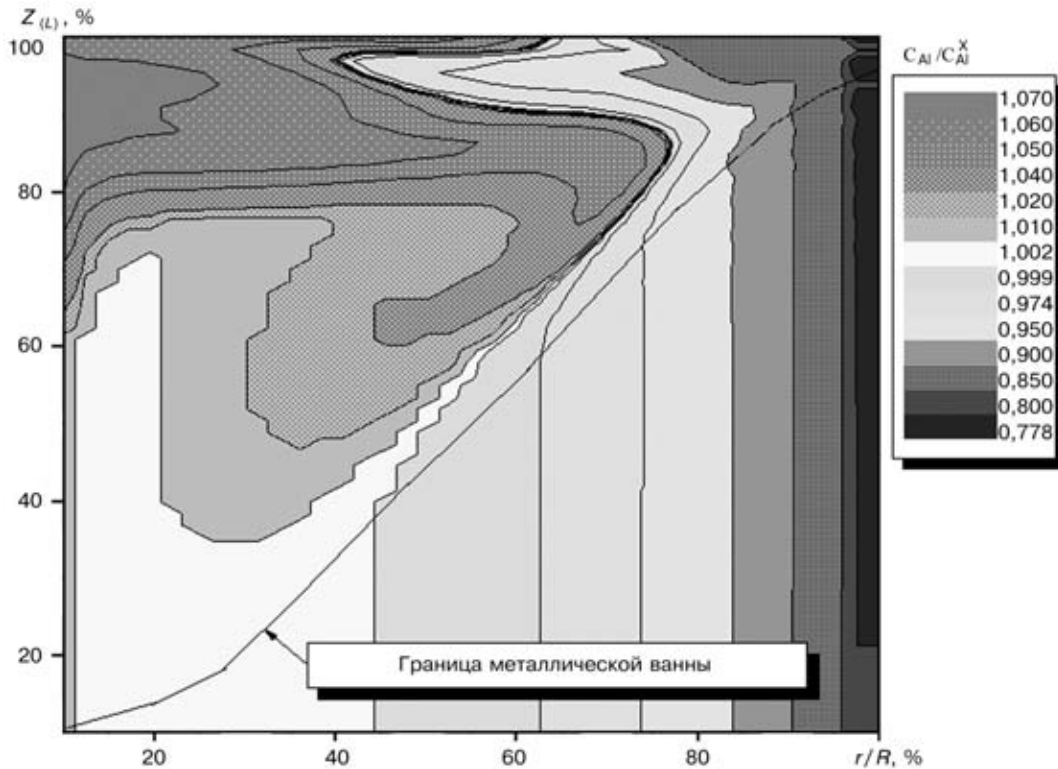


Рис. 4. Карта изоконцентрат относительного распределения алюминия в металлической ванне при равномерном подогреве центральной части свободной поверхности расплава ($Z_{(L)} = (1 - (H(t) - z) / h) \cdot 100\%$)

содержанием алюминия. Модель позволяет исследовать тепловое, концентрационное и гидродинамическое состояние слитка в зависимости от технологических параметров переплава.

2. Приведенные результаты позволяют оценить удельные потоки испарения и массовые потери алюминия, относительное распределение легирующего компонента по сечению выплавленного слитка, степень угара и выделить в слитке зоны с повышенной химической однородностью.

3. Выявлены закономерности и механизмы формирования локальной химической неоднородности в жидком и затвердевающем металле при равномерном подогреве центральной зоны зеркала ванны с максимальным сосредоточением теплового потока только вблизи стенки кристаллизатора.

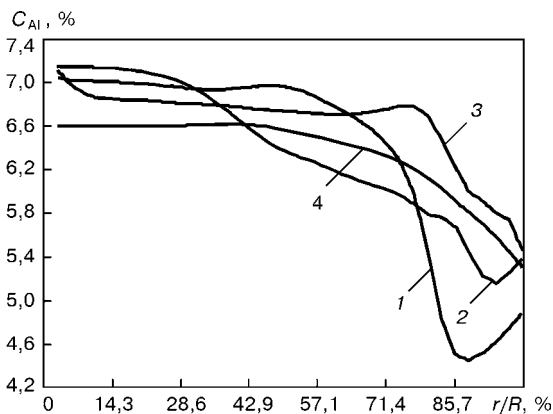


Рис. 5. Распределение алюминия вдоль радиуса слитка для горизонтов металлической ванны: 1 – 114 см; 2 – 113 см; 3 – 112 см; 4 – 105 см

1. Патон Б. Е. Современные электронно-лучевые технологии Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 22–34.
2. Математическая модель расчета состава металла при электронно-лучевом переплаве жаропрочных сплавов на основе никеля / В. Н. Бороненков, М. Л. Жадкевич, А. М. Саламатов, С. В. Ахонин // Там же. — 1995. — № 2. — С. 24–35.
3. Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью / И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб, А. Н. Калинин // Там же. — 1997. — № 4. — С. 15–21.
4. Термогидродинамическое состояние расплава при электронно-лучевом переплаве слитка титана / Ж. П. Белло, А. Жарди, А. Анс, Д. Аблизер // Там же. — 1997. — № 3. — С. 3–18.
5. Electron beam remelting of superalloys with low evaporation losses and high cleanliness / M. Blum, A. Choudhury, M. Romberg, H. Scholz // Proc. Conf. on electron beam melting and refining. — State of the art 1992, Reno (USA). — P. 160–168.
6. Jardy A., Ablitzer D. Comportement du puits liquide des lingots VAR // Memoires et etudes scientifiques de la Revue de Metallurgie. — 1990. — 87, N 7–8. — P. 421–427.
7. Jardy A., Ablitzer D. On convective and turbulent heat transfer in VAR ingot pools // 5th Int. Conf. on modelling of casting, welding and advanced solidification processes. — Sept. 1990, Davos (Suisse). — P. 699–706.
8. Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Жадкевич М. Л. Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 2. — С. 17–21.
9. Белло Ж. П., Дюваль А., Аблизер Д. Кинетика процессов испарения в вакуумной металлургии // Там же. — 1999. — № 4. — С. 25–39.
10. Демченко В. Ф. Разностные схемы для уравнения конвективной диффузии // Proceedings International Colloquium. — София: ВМЕИ, 1983. — С. 24–49.
11. Демченко В. Ф., Лисний О. Б. Лагранжево-ейлеровый метод численного розв'язку багатомірних задач конвективної дифузії. // Доповіді Національної академії наук України. — 2000. — № 11. — С. 71–75.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 23.06.2003