КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛИТКА В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Сидоров Олег Юрьевич,

профессор, доктор технических наук, Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижний Тагил, e-mail: <u>sidorov-ou-62@yandex.ru</u>

Сарапулов Сергей Федорович,

профессор, доктор технических наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: <u>sarapuloff@yandex.ru</u> Швыдкий Евгений Леонидович.

аспирант, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: <u>e.l.shvydky@urfu.ru</u>

CRYSTALLIZATION OF METAL INGOTS IN A RUNNING MAGNETIC FIELD Sidorov Oleg Yurjevich,

Professor, Doctor of Technical Sciences, Nizhny Tagil technological Institute (branch) Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin", Nizhny Tagil, e-mail: <u>sidorov-ou-62@yandex.ru</u>

Sarapulov Sergej Fedorovich,

Professor, Doctor of Technical Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, e-mail: <u>sarapuloff@yandex.ru</u>

Shvydky Evgeny Leonidovich,

Post-graduate Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, e-mail: <u>e.l.shvydky@urfu.ru</u>

Аннотация. Проведены расчеты электромагнитного, гидродинамического и температурного полей кристаллизующегося слитка диаметром 163 мм. Вблизи внешней границы слитка находятся мелкие кристаллы и дендриты, в средней части дендриты и в центральной части слитка располагаются более крупные глобулярные кристаллы.

Ключевые слова. Электромагнитное поле, гидродинамическое поле, температурное поле, скорость кристаллизации, структура слитка.

Abstract. The calculations of electromagnetic, hydrodynamic and thermal fields of the crystallizing ingot with a diameter of 163 mm. Near the outer boundary of the ingot are small crystals, and dendrites, in the middle part of the dendrites in the Central part of the ingot are larger globular crystals.

Keywords. Electromagnetic field, flow field, temperature field, rate of crystallization, the structure of the ingot.

Управление процессом формирования структуры металлического слитка при его кристаллизации из жидкой фазы возможно с применением бесконтактного электромагнитного воздействия. Воздействие электромагнитного поля выражается в измельчении зерна, выравнивании химического состава по объему слитка [1]. При этом величина зерна может быть связана с локальной скоростью охлаждения (см., например, [2]). В исследовании ставится задача моделирования структуры (величины зерна) слитка при его кристаллизации во внешнем электромагнитном поле. Последняя предполагает:

- расчет электромагнитного поля;
- расчет гидродинамического поля;
- расчет температурного поля;
- оценка величины и формы зерна через взаимосвязь со скоростью кристаллизации.

Для решения подобного рода задач необходимо применение комплексного похода, учитывающего процессы различной физико-химической природы и с различными постоянными времени. Электромагнитные процессы в данном случае можно рассматривать как квазиустановившиеся. Гидродинамические характеристики (скорость и давление) необходимо пересчитывать на каждом временном шаге, т.к. границы области могут меняться из-за появления новых кристаллов. Тепловые процессы рассматриваются в динамике.

В качестве объекта исследования выбран электромагнитный кристаллизатор (ЭК) для литья латунной цилиндрической заготовки диаметром 163 мм.

Индуктор ЭК имеет характеристики, приведенные в таблице.

Параметры индуктора: длина L = 0,255 м, высота h = 0,138 м, Ширина b = 0,095 м, Высота спинки $h_{cn} = 0,057$ м, Высота паза $h_n = 0,081$ м, Высота меди в пазу $h_M = 0,079$ м, Ширина паза $b_n = 0,025$ м, Ширина зубца $b_3 = 0,015$ м, Зубцовый шаг $t_3 = b_n + b_3 = 0,04$ м.

Катушки обмотки выполнены из медной ленты сечением 23 х 0,98 мм², число витков в катушке 55, схема соединения обмоток: AAZZBBXXCCYY. Плотность тока: 3 А/мм². Жидкий сплав (латунь) кристаллизуется в водоохлаждаемой гильзе, отделяющей расплав от индуктора.

Для решения полевых задач использовалась цилиндрическая система координат и предполагалось наличие цилиндрической симметрии.

В цилиндрической системе координат и при наличии цилиндрической симметрии система уравнений электромагнитного поля может быть приведена к одному уравнению [3,4]

$$-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{A}{\mu r}+\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial r}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial z}\right)+\beta\frac{\partial A}{\partial z}+\alpha\cdot\left(\frac{A}{\varphi}+\frac{\partial A}{\partial r}\right)+j\cdot\omega\cdot\gamma\cdot A_{\varphi}=J_{\varphi} \qquad (1)$$

с граничными условиями векторного потенциала $A_{o} = 0$ при r = 0, $r = \infty$ и учетом не-

прерывности тангенциальной компоненты напряженности электрического поля и нормальной компоненты магнитной индукции при переходе из одной среды в другую. Кроме того, в уравнении (1) $\beta = -\gamma \cdot w$ и $\alpha = -\gamma \cdot v$ (γ - удельная электропроводность среды; ν, w - компоненты скорости движения среды).

Для моделирования электромагнитного поля применялся метод конечных разностей, в котором были учтены движение вторичного элемента и возникающие во вторичном элементе (ВЭ) индукционные токи.

Методика решения уравнения (1) подробно изложена в работах [3,4].

Движение расплава в кристаллизующемся слитке с цилиндрической симметрией описывается с помощью уравнений, приведенных, например, в [4].

Для решения уравнений (2), (3) применялся метод конечных разностей с использованием шахматной сетки (см., например, [5]). Методика нахождения гидродинамического поля подробно изложена в работе [4].

Распределение температур в движущейся среде в цилиндрической системе координат для осесимметричного устройства может быть описано уравнением [4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial r} - w \frac{\partial T}{\partial z} + a_t \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{\rho C_p} + \frac{L}{C_p} \frac{\partial \psi}{\partial t} . \tag{2}$$

Здесь q_V – мощность внутренних источников тепла (Джоулево тепло от индукционных токов); a_t - турбулентная температуропроводность; L, ψ - теплота кристаллизации и доля твердой фазы соответственно; C_p, ρ - теплоемкость и плотность соответственно, v и w - компоненты скорости по координатам r и z соответственно.

Частные производные были аппроксимированы конечными разностями. Для интегрирования уравнения (2) был применен метод Рунге-Кутта 3-4 порядка с контролем точности решения [3]. Использовались граничные условия III-го рода. Решения полевых задач и визуализация результатов были проведены с помощью авторского пакета программ.

Фрагмент расчетной области показан на рисунке. Область жидкого расплава была разделена на 10 слоев по оси *r* (горизонтальная ось) и на 56 слоев по оси *z* (вертикальная ось). Приняты обозначения: 1- расплав, 2 - магнитопровод, A,Z,B -обмотка, 4 - воздух, 5-изложница, 6-теплоизолятор.

Наибольшее значение *B*_r составляет порядка 0,015 Тл. Расчетное поле скоростей имеет двухвихревой характер с максимальными скоростями на оси симметрии (*r*=0) порядка 0,7 м/с. В слое расплава максимально приближенного к индуктору наибольшая скорость составляют около 0,4 м/с.

При моделировании кристаллизации начальная температура расплава принималась равной 1090 К. Кристаллизация начиналась при 1083 К и заканчивается при 950 К. Были созданы условия торможения теплообмена в верхней и нижней частях металлического расплава с целью обеспечения условий, подобных экспериментальным.

Ранее [6] было получено, что величина зерна по радиусу слитка может быть связана со скоростью кристаллизации:

1-я часть: вытянутые зерна около 10 мм – скорости охлаждения около 1,8 · 10⁻⁴ кг/с; **2-я часть**: вытянутые зерна около 20-30 мм – скорости охлаждения около 0,7 · 10⁻⁴-1,8 · 10⁻⁴ кг/с; **3-я часть**: глобулярные зерна размером 10-20 мм – скорости охлаждения меньше 0,7 · 10⁻⁴ кг/с.

Эти ориентировочные феноменологические правила могут быть использованы для моделирования величины зерна слитка в процессе его кристаллизации.

На рисунке показана расчетная структура слитка через 23 минуты после начала вычислений (ось *r=0* слева; индуктор справа). Из этих результатов следует, что во внешнем слое слитка образуются более мелкие вытянутые кристаллы (сплошные малые эллипсы). Рядом с ними и далее к центру слитка образуются кристаллы в форме дендритов (горизонтальные и наклонные прямые, показывающие направление их роста). Затем начинается образование более крупных глобулярных зерен (большие штриховые эллипсы), расположенных вблизи оси слитка.

Из сравнения структур видно, что произошли изменения во внешнем слое слитка: в нем появились дендритные структуры. В центральной части слитка сформировались глобулярные более крупные кристаллы. Затем при удалении от оси образовалась переходная зона из дендритов и глобулярных кристаллов. Далее находится зона дендритов, и в зоне приближенной к индуктору находятся дендритные и мелкие вытянутые кристаллы. Можно отметить, мелкие вытянутые кристаллы (малые эллипсы) расположены напротив паза с обмоткой индуктора, а дендриты (горизонтальные или наклонные прямые) – напротив зубца индуктора.



Рис. Фрагмент расчетной области (а) и структура слитка через 23 мин. (б) и 33 мин. (вб). Штриховые линии - доля твердой фазы меньше 75%.. Сплошные линии – доля твердой фазы больше 75%

Полученная структура слитка качественно согласуется с работами [1,2] и собственными исследованиями авторов.

Список использованных источников

1. Самойлович Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка / Ю.А. Самойлович. – Киев: Наукова думка, 1983. – 248 с.

2. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов / У. Вайнгард, - М.: Мир, 1967. - 167 с.

3. Сидоров О.Ю. Конечно-разностное моделирование характеристик осесимметричного индукционного устройства /О.Ю. Сидоров, В.А. Семенов, С.Ф. Сарапулов // Изв.вузов. Электромеханика. – 2001. - №1. - С. 32-35.

4. Сидоров О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. -М.: Энергоатомиздат, 2010. – 331 с.

5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. - М.: Мир, 1984. - 152 с.

6. Сидоров О.Ю. Моделирование затвердевания металлического расплава в электромагнитном кристаллизаторе/ О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АППЭЭТ-2014: Сб.научн.тр. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2014. – С. 97-101.