

Мочалов А. А.,  
Шаповал Н. А.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОХОЛОДИЛЬНИКОВ С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

*В статье представлено исследование взаимодействия инокуляторов с жидким металлом для обеспечения объемной кристаллизации. Разработана математическая модель движения микрохолодильников в расплаве непрерывного слитка в неоднородном магнитном поле, позволяющая рассчитать скорость и путь, проходимый микрохолодильниками за время их существования, что дает возможность рассчитать протяженность зон в кристаллизаторе, влияющие на скорость вытягивания слитка.*

**Ключевые слова:** микрохолодильник, инокулятор, объемная кристаллизация, непрерывный слиток, кристаллизатор, градиент магнитного поля.

### 1. Введение

Во всех развитых странах металлургия является одной из наибольших энергоемких отраслей производства. Структурные изменения отечественной промышленности, которые соответствуют условиям рынка, обуславливают необходимость модернизации существующих, а также создание новых металлургических заводов и установок, которые обеспечили бы высокую продуктивность, экономичность, высокое качество продукции при низких инвестиционных затратах производства.

Такой перспективной и ориентированной на требования рынка технологией есть непрерывное литье стали в заготовки, размер которых максимально приближен к размерам готового продукта [1, 2].

Существующие способы получения непрерывного разлива металла имеют определенные недостатки: малую скорость вытягивания слитка, большую протяженность глубины жидкой лунки и существенную неоднородность температурного поля среза слитка, что не дает возможность использовать его для горячего проката [1, 3–5]. Этим обосновывается актуальность проведенного исследования.

Данное исследование посвящено интенсификации процесса кристаллизации непрерывного слитка при использовании объемной кристаллизации в соответствующем срезе кристаллизатора. А также, посвящено исследованию взаимодействия инокуляторов (микрохолодильников) с жидким металлом и исследованию скорости движения ферромагнитной частицы в расплаве под действием неоднородного магнитного поля.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Стремление повышения качества толстого металла привело к ряду технологий: снятия температуры перегрева с помощью инокуляторов и получение слитка путем введения в жидкий металл готовых слитков того же металла для ускорения кристаллизации [6–9].

В данное время в процессе производства металлопродукции возникла необходимость объединения

непрерывного разлива с непрерывным прокатом, что дает возможность повысить продуктивность получения продукта с металла и снизить энергозатраты.

К сожалению, в настоящее время микрохолодильники используются только для снятия температуры перегрева жидкого металла и в суспензионном литье [3]. На Украине подобного проекта до сих пор не было практически реализовано в промышленности, из-за малого времени существования микрохолодильников в жидком металле. Нынешние установки непрерывного разлива стали вычерпали свои возможности по увеличению скорости кристаллизации.

Анализируя опубликованные работы можно сделать вывод, что интенсификация отвода тепла от металла в жидкой лунке непрерывного слитка, согласно существующих теорий, возможна только за счет интенсивного отвода тепла от поверхности непрерывного слитка. Однако, понижение температуры поверхности слитка приводит к термическому растрескиванию поверхности металла, ухудшая его качество.

Решить эту проблему можно только за счет организации объемной кристаллизации в жидкой лунке непрерывного слитка, при этом отводить теплоту фазового перехода необходимо изнутри жидкой лунки.

### 3. Объект, цель, задачи исследования

*Объект исследования* — процесс получения заготовок непрерывного литья с равномерным распределением температур по сечению слитка.

*Целью исследования* является выбор и обоснование критериев оптимизации технологического процесса, которые обеспечивают объемную кристаллизацию в заданном срезе слитка, и параметров объемной кристаллизации металлического слитка.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработка физической и математической моделей кристаллизации непрерывного слитка с использованием неоднородного магнитного поля;
- проведение исследования взаимодействия микрохолодильников с жидким металлом и скорости дви-

жения ферромагнитной частицы в неоднородном магнитном поле.

**4. Методика исследования взаимодействия инкуляторов с жидким металлом**

Рассмотрим взаимодействие микрохолодильников, вводимых в расплав для обеспечения объемной кристаллизации с жидким металлом.

Закон распределения частиц по размерам  $\frac{dN}{N} = \frac{\Delta N_i}{N} = f(R)$  (где  $\Delta N_i$  — число микрохолодильников с размером  $(R_i, R_i + \Delta R)$ ,  $N$  — общее число частиц вводимых в расплав) будет оказывать существенное влияние на процессы, протекающие в расплаве при взаимодействии их с жидким металлом. Частицы (микрохолодильники) малых размеров, лежащих в диапазоне  $(R_i, R_i + \Delta R)$  попав в расплав с температурой  $T_1 = T_{кр} + \Delta T_1$  (где  $T_{кр}$  — температура кристаллизации расплава,  $\Delta T$  — температура перегрева), расплавляются не достигнув зоны объемной кристаллизации.

Рассчитать, как изменится первоначальный закон распределения частиц вводимых в расплав, в процессе движения частиц в жидком металле и с каким законом распределения они поступят в зону объемной кристаллизации, можно используя результаты математического моделирования, изложенные в статьях [10, 11].

Зная время существования частиц [11, 12], можно рассчитать какое количество мелких частиц должно присутствовать в законе распределения частиц по размерам  $\frac{\Delta N}{N} = f(R_i)$ , чтобы снять теплоту перегрева (т. е.

температуру перегрева  $\Delta T_1$ ) и определить протяженность этой зоны.

Поэтому, если известен закон распределения частиц по размерам на входе в расплав (рис. 1), в начальный момент времени  $t = 0$ , то спустя время  $t$ , закон распределения частиц по размерам изменится за счет намораживания металла на микрохолодильник, изменится он и по другой причине, часть частиц малого размера расплавится. Поэтому, при расчете особенностей кристаллизации непрерывного слитка с использованием неоднородного магнитного поля, необходимо учитывать этот фактор.

Достигнув зоны объемной кристаллизации, в законе распределения частиц по размерам будут присутствовать фракции с большими размерами, так как

фракции малых размеров  $\frac{4}{3}\pi\rho_T \sum_{i=1}^k R_i^3$  полностью рас-

плавятся, сняв при этом теплоту перегрева жидкого металла в верхней части кристаллизатора, образовав зону снятия перегрева (рис. 2).

После зоны снятия температуры перегрева идет зона изотермической кристаллизации движущихся частиц с среднинегальной температурой  $\bar{T}_{2i}$ . На эти частицы будет намораживаться твердая корочка, при этом распределение частиц по результатам будет изменяться в сторону увеличения размеров (рис. 2).

После изотермической зоной кристаллизации располагается зона объемной кристаллизации. В этой зоне частицы будут неподвижны, так как они достигнут зоны

полностью затвердевшего металла, и в ней будет происходить объемная кристаллизация. Частицы, достигшие зоны объемной кристаллизации, закристаллизуют жидкий металл, находящийся между ними, за счет своей теплоемкости. Для достижения лучшей интенсификации процесса кристаллизации, зоны объемной кристаллизации должны достигать частицы с максимальным радиусом намораживаемой корочки.

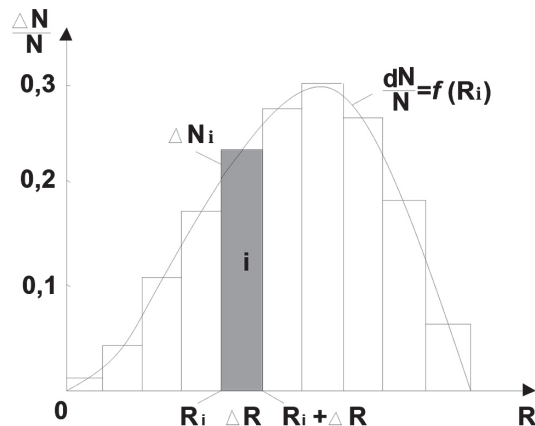


Рис. 1. Распределение микрохолодильников по размерам, вводимых в расплав для обеспечения объемной кристаллизации, где  $\Delta N_i$  — число частиц (микрохолодильников), лежащих в диапазоне размеров  $(R_i, R_i + \Delta R)$

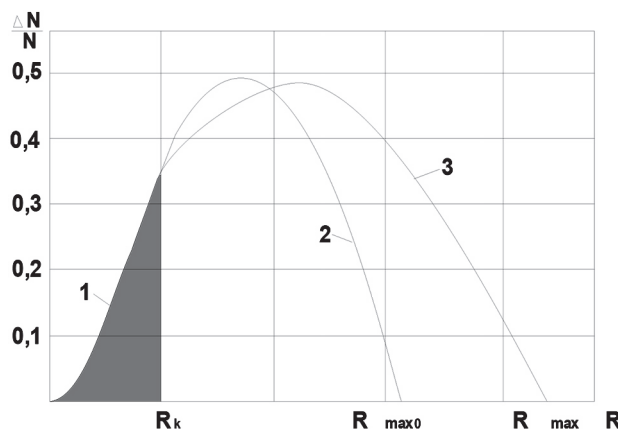


Рис. 2. Закон распределения частиц по размерам в зоне снятия перегрева 1 (частицы, размер которых лежит в диапазоне  $(0 - R_k)$ , расплавятся), вышедшие из зоны перегрева 2, поступившие в зону объемной кристаллизации 3 с учетом намороженной корочки

Если объем, в котором находятся все размеры твердых сфер, обозначим через  $a^3$  (или  $a \times b \times c$ ), то объем не заполненный твердыми сферами (частицами) можно записать так:

$$V_{ж} = a^3 - \frac{4}{3}\pi R_1^3 N_1 - \frac{4}{3}\pi R_2^3 N_2 - \frac{4}{3}\pi R_3^3 N_3 - \dots,$$

где  $R_1, R_2, R_3, \dots$  — размеры твердых сфер;  $N_1, N_2, N_3, \dots$  — количество твердых сфер, находящихся в объеме  $a^3$ .

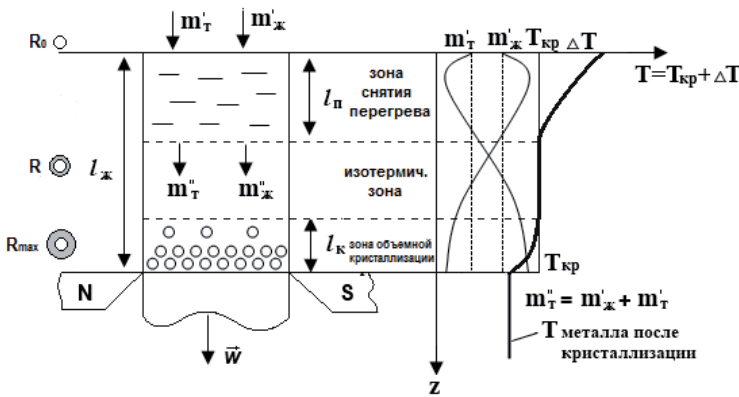
В более компактном виде  $V_{ж}$ , будет:

$$V_{ж} = a^3 - \frac{4}{3}\pi \sum_{i=k}^n R_i^3 N_i.$$

Тогда коэффициент упаковки для произвольных размеров частиц примет вид:

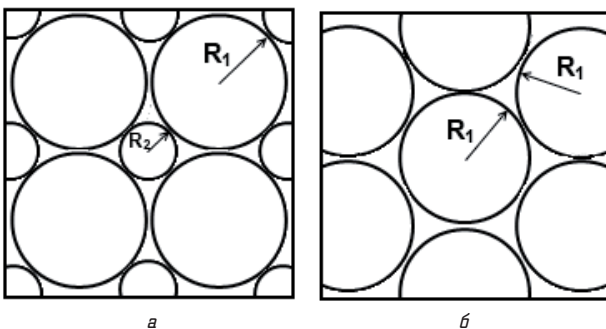
$$\eta = \frac{a^3 - \frac{4}{3}\pi \sum_{i=k}^n R_i^3 N_i}{a^3} = 1 - \frac{4}{3}\pi \sum_{i=k}^n \frac{R_i^3 N_i}{a^3}.$$

Зная время существования частиц, соответствующего радиуса, можно вычислить на какой глубине жидкого металла, залитого в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали, будет снята температура перегрева  $\Delta T_1$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема распределения зон в жидком металле кристаллизатора, изменение температур в них и роста намораживаемой корки на микрохолодильник, где  $L_{ж}$  — глубина жидкого металла в кристаллизаторе,  $L_n$  — глубина зоны снятия перегрева,  $L_k$  — толщина зоны объемной кристаллизации

Согласно математическим моделям процесса теплообмена, изложенного в [11, 12], если мелких частиц будет слишком много, вязкость расплава резко возрастет, что будет усложнять продвижение более крупных частиц в зону объемной кристаллизации. Это приведет к тому, что увеличится время пребывания этих частиц в расплаве и возможное их расплавление. При этом возрастет средне интегральная температура частицы и может оказаться, что, при достижении ими зоны объемной кристаллизации, будет недостаточно того количества тепла, которое они могут отвести от жидкого металла, находящегося между плотной сферической упаковкой твердых частиц (рис. 4).



**Рис. 4.** Возможные виды упаковок частиц в зоне объемной кристаллизации: а — для полидисперсной системы, б — для монодисперсной системы

Кроме того, при организации объемной кристаллизации, в зоне объемной кристаллизации непрерывного слитка возможны различные виды упаковок вводимых частиц, некоторые из них показаны на рис. 4.

### 5. Методика исследования скорости движения ферромагнитной частицы в расплаве при наличии неоднородного магнитного поля

Важными параметрами для технологического процесса, обеспечивающего объемную кристаллизацию непрерывного слитка, являются продолжительность существования микрохолодильников в жидком металле, время, за которое на микрохолодильник намораживается максимальная масса металла (толщина намороженной корочки), а также скорость движения ферромагнитной частицы (микрохолодильника) в неоднородном магнитном поле кристаллизатора и путь пройденный частицей в расплаве [12].

Рассмотрим движение твердых частиц металла в расплаве под действием неоднородного магнитного поля. При этом на частицу будут действовать силы: тяжести, Архимеда, вязкого трения, сила, действующая на магнетики со стороны неоднородного магнитного поля  $\frac{dB}{dz}$ . Исходя из этого, уравнение движения

частицы запишется так:

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = \frac{4}{3}\pi R_i^3 g(\rho_{т} - \rho_{ж}) + P_i \frac{dB}{dz} - 6\pi R_i \eta V_i, \quad (1)$$

где  $m_i = \frac{4}{3}\pi \rho_{т} R_i^3$  — масса  $i$ -ой частицы;  $V_i$  — скорость движения частицы  $i$ -го размера, м/с;  $R_i$  — радиус  $i$ -ой частицы, м;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{т}$  — плотность жидкого металла и твердого, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  — вязкость расплава, кг/м·с;  $P_i$  — магнитный момент  $i$ -ой частицы, А·м<sup>2</sup>;  $\frac{dB}{dz}$  — градиент неоднородного магнитного поля, Тл/м.

Преобразовав уравнение движения (1), получим:

$$\frac{dV_i}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}}\right)g + \frac{P_i}{\frac{4}{3}\pi R_i^3 \rho_{т}} \cdot \frac{dB}{dz} - \frac{6\pi R_i \eta V_i}{\frac{4}{3}\pi R_i^3 \rho_{т}}. \quad (2)$$

Если ввести понятие магнитного момента единицы массы  $P_m = \frac{P_i}{\frac{4}{3}\pi R_i^3 \rho_{т}}$ , и проинтегрировав выражение (2), найдем изменение скорости  $i$ -ой частицы со временем:

$$V_i = V_{i0}e^{-bt} + \frac{a}{b}(1 - e^{-bt}), \quad (3)$$

где

$$a = g \left( 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}} \right) g + P_m \frac{dB}{dz}, \quad b = \frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}}$$

Интегрируя уравнение (3), найдем путь проходимый  $i$ -ой частицей за время  $t$ , в обозначениях:

$$l_i = \frac{V_{i0}}{b} (1 - e^{-bt}) + \frac{a}{b} \left( t - \frac{1}{b} (1 - e^{-bt}) \right). \quad (4)$$

После преобразования получим:

$$l_i = \frac{a}{b} t + \left( V_{i0} - \frac{a}{b} \right) \frac{(1 - e^{-bt})}{b}. \quad (5)$$

Подставив в выражения (4) и (5) значение величин  $a$  и  $b$ , получим выражение для скорости и пройденного пути  $i$ -ой частицей:

$$V_i = V_{i0} e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t} + \frac{g \left( 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}} \right) + P_m \frac{dB}{dz}}{\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}}} \left( 1 - e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t} \right), \quad (6)$$

$$l_i = \frac{g \left( 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}} \right) + P_m \frac{dB}{dz}}{\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}}} t + \left( V_{i0} - \frac{g \left( 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}} \right) + P_m \frac{dB}{dz}}{\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}}} \right) \frac{1 - e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t}}{\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}}}. \quad (7)$$

Анализируя полученные уравнения и учитывая, что плотности твердого и жидкого металла мало отличаются друг от друга, полученные уравнения можно упростить так:

$$V_i = V_{i0} e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t} + \frac{2R_i^2 \rho_{т} P_m \frac{dB}{dz}}{9\eta} \left( 1 - e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t} \right), \quad (8)$$

$$l_i = \frac{2R_i^2 \rho_{т}}{9\eta} \left[ P_m \frac{dB}{dz} t + \left( V_{i0} - \frac{2R_i^2 \rho_{т} P_m \frac{dB}{dz}}{9\eta} \right) \left( 1 - e^{-\frac{9\eta}{2R_i^2 \rho_{т}} t} \right) \right]. \quad (9)$$

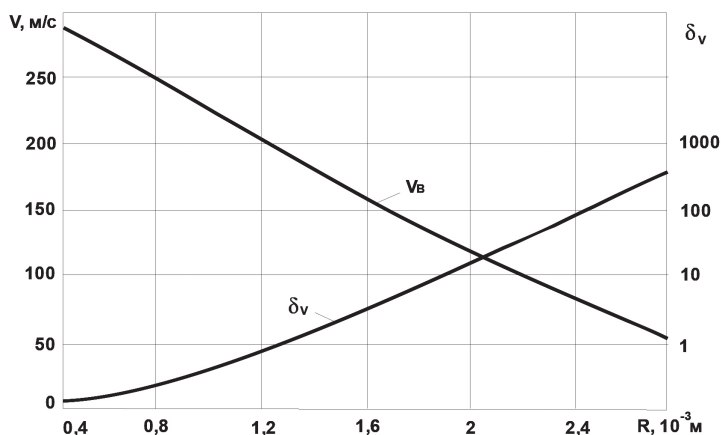
## 6. Результаты исследования движения микрохолодильников в жидком металле

Используя выражения (8) (технологический параметр) рассчитаем значение скорости  $i$ -ой частицы. Результаты представим в виде графиков. Чтобы сравнить скорости движения  $i$ -ой частицы в расплаве под действием

неоднородного магнитного поля и без поля, представим

графики относительной скорости  $\delta_V = \frac{V_g}{V_B}$  на этих же

графиках (рис. 5), где  $V_g$  — скорость  $i$ -ой частицы в гравитационном поле,  $V_B$  — скорость  $i$ -ой частицы в неоднородном магнитном поле.



**Рис. 5.** График зависимости установившейся скорости движения  $i$ -ой частицы в расплаве от радиуса, при следующих параметрах для стали:  $\rho_{жр} = 2,72 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$ ,  $c_{ж} = 448 \text{ Дж/кг} \times \text{К}$ ,  $c_{т} = 747 \text{ Дж/кг} \times \text{К}$ ,  $T_{жр} = 1773 \text{ К}$ ,  $\Delta T = 20 \text{ К}$ ,  $dB/dz = 17 \text{ Тл/м}$

Анализируя результаты расчета и выражения (8), (9) можно сделать следующий вывод, что скорость и пройденный путь  $i$ -ой частицы зависит от квадрата ее радиуса и градиента магнитного поля  $dB/dz$ , так как магнитный момент единицы массы не зависит от размера частицы. Выражение (9) показывает, что путь пройденный частицей в расплаве, будет больше у частиц большего размера, так как у этих частиц больше магнитный момент  $P_m$ . Установили, что скорость движения микрохолодильника в расплаве при наличии неоднородного магнитного поля превышает скорость движения микрохолодильника в гравитационном поле в 100 раз при градиенте магнитного поля  $dB/dz = 17 \text{ Тл/м}$ .

## 7. Обсуждение результатов исследования взаимодействия микрохолодильников с жидким металлом

Новая методика расчета технологических параметров обеспечивает создание условий для объемной кристаллизации в непрерывном слитке при наличии градиента неоднородного магнитного поля, что дает возможность разработать и создать принципиально новые установки непрерывной разливки стали с объемной кристаллизацией.

Предложенный способ объемной кристаллизации непрерывного слитка в заданном сечении с использованием неоднородного магнитного поля позволяет существенно улучшить качество получаемой продукции, существенно уменьшить габаритные характеристики установки непрерывного литья, увеличить ее производительность и обеспечить равномерное распределение заданной температуры по сечению слитка. А также дает возможность совместить установку непрерывной разливки с установкой непрерывной прокатки. Разработанные методики могут быть использованы при разработке нового

класса машин непрерывного литья с использованием дисперсных инокуляторов и магнитного поля. Спроектированные установки непрерывной разливки стали по предлагаемым математическим моделям позволяют существенно снизить материальные и временные затраты при производстве металлопроката.

Данные методики усовершенствованы, а также усовершенствованы физические и математические модели процессов тепло-, массообмена микрохолодильников полидисперсного состава с расплавом, которые обеспечивают объемную кристаллизацию непрерывного слитка с использованием неоднородного магнитного поля.

## 8. Выводы

В результате проведенных исследований построены математические модели для коэффициента упаковки произвольных размеров частиц, для определения скорости и пройденного пути частицей в жидком металле с использованием неоднородного магнитного поля. За счет действия неоднородного магнитного поля микрохолодильники (ферромагнитные частицы) с большей скоростью «втягиваются» в жидкий металл, достигая зоны объемной кристаллизации. В этой зоне частицы за счет своей теплоемкости охлаждают металл, что увеличивает скорость кристаллизации и повышает качество самого непрерывнолитого металла. Эти модели позволяют определить протяженность жидкой лунки, скорость вытягивания закристаллизовавшегося непрерывного слитка.

В результате численного эксперимента с использованием представленной методики расчета параметров установили, что дисперсионный состав микрохолодильников существенно влияет на глубину жидкого металла в кристаллизаторе. А также установили, что скорость движения инокуляторов в расплаве при наличии неоднородного магнитного поля повышается в 100 раз, при этом среднее интегральная температура получаемого слитка по всем срезам соответствует температуре горячей прокатки, т. е. это позволяет совместить установку непрерывного литья с установкой непрерывного проката.

## Литература

1. Коздоба, Л. А. Методы решения задач затвердевания [Текст] / Л. А. Коздоба // Физическая и химическая обработка материалов. — 1973. — № 2. — С. 41–52.
2. Баптизматский, В. И. Разливка стали [Текст] / В. И. Баптизматский. — Киев-Донецк: Вища школа, 1977. — 197 с.
3. Баландин, Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок [Текст] / Г. Ф. Баландин. — М.: Машиностроение, 1973. — 285 с.
4. Беляев, Н. М. Математическое моделирование нелинейных задач теплопроводности с подвижными границами расчетной области [Текст] / Н. М. Беляев, Н. М. Барабаш // Математические методы тепломассопереноса. — 1979. — № 1. — С. 30–43.
5. Голен-Торн, В. О. Кристаллизация и строение слитка [Текст] / В. О. Голен-Торн // Металлург. — 1937. — № 2. — С. 11.
6. Самойлович, Ю. А. Формирование слитка [Текст] / Ю. А. Самойлович. — М.: Металлургия, 1977. — 159 с.
7. Talmon, Y. Moving boundary problems in simple shapes solved by isotherm migration [Text] / Y. Talmon, H. T. Davis, L. E. Scriven // AIChE Journal. — 1983. — Vol. 29, № 5. — P. 795–800. doi:10.1002/aic.690290513
8. Talmon, Y. Progressive freezing of composites analyzed by isotherm migration methods [Text] / Y. Talmon, H. T. Davis, L. E. Scriven // AIChE Journal. — 1981. — Vol. 27, № 6. — P. 928–937. doi:10.1002/aic.690270608
9. Talmon, Y. Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts [Text] / Y. Talmon, H. Davis // Journal of Food Science. — 1981. — Vol. 46, № 5. — P. 1478–1488. doi:10.1111/j.1365-2621.1981.tb04202.x
10. Мочалов, А. А. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников [Текст] / А. А. Мочалов, А. А. Гайша, Н. А. Шаповал // Збірник наукових праць НУК. — 2008. — № 6(423). — С. 76–80.
11. Мочалов, А. А. Математическая модель намораживания металла на микрохолодильник [Текст] / А. А. Мочалов, Н. А. Шаповал // Математичне моделювання. — 2009. — № 1(20). — С. 78–80.
12. Шаповал, Н. А. Исследование движения и распределения ферромагнитных частиц в расплаве под действием неоднородного магнитного поля [Текст]: матеріали Всеукр. науково-технічної конференції / Н. А. Шаповал // Теоретичні проблеми та прикладні аспекти сучасної технічної фізики. — Севастополь: НУК ім. адм. Макарова, Фізико-тех. ін-т металів і сплавів НАНУ, 2010. — С. 21–22.

## ВЗАЄМОДІЯ МІКРОХОЛОДИЛЬНИКІВ З РІДКИМ МЕТАЛОМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

В статті представлено дослідження взаємодії інокуляторів з рідким металом для забезпечення об'ємної кристалізації. Розроблена математична модель руху мікрохолодильників в розплаві безперервного злитка у неоднорідному магнітному полі, яка дозволяє розрахувати швидкість та шлях, пройдений мікрохолодильниками за час їх існування, що дає можливість розрахувати протяжність зон в кристалізаторі, які впливають на швидкість витягування злитка.

**Ключові слова:** мікрохолодильник, інокулятор, об'ємна кристалізація, безперервний злиток, кристалізатор, градієнт магнітного поля.

*Мочалов Александр Александрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна. Шаповал Наталья Александровна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра фізики, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: shapovalnataasha1@rambler.ru.*

*Мочалов Олександр Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна. Шаповал Наталія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра фізики, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.*

*Mochalov Aleksandr, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine. Shapoval Natalia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: shapovalnataasha1@rambler.ru*