

Лосев, Г.Л. Анализ формы и темпа продвижения твердой фазы при направленной кристаллизации цветных металлов с электромагнитным воздействием ультразвуковым и температурным методами / Г.Л. Лосев, А.Д. Мамыкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 4. – С. 170–179. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.15

Losev G.L., Mamykin A.D. Analysis of the form and evolution of the solid phase during directional crystallization of non-ferrous metals with electromagnetic influence by ultrasonic and temperature methods. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 170-179. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.15

УДК 537.84

АНАЛИЗ ФОРМЫ И ТЕМПА ПРОДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПРИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ И ТЕМПЕРАТУРНЫМ МЕТОДАМИ

Г.Л. Лосев, А.Д. Мамыкин

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июня 2022 г.
Одобрена: 05 декабря 2022 г.
Принята к публикации:
12 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

кристаллизация, фазовый переход, жидкий металл, бегущее магнитное поле, ультразвуковая доплеровская анемометрия, конвекция, измерительные методы, анализ сигналов, линейная индукционная машина, электромагнитное перемешивание.

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению нестандартных механизмов управления процессом направленной кристаллизации цветных металлов. В рамках работы разрабатываются и апробируются измерительные техники, пригодные как для лабораторных моделей, так и для условий, приближенных к производственным. Предлагается механизм управления темпом и однородностью кристаллизации металлического расплава посредством изменения фазных углов между токами питания индукционного перемешивателя бегущего магнитного поля. Изменение фазных углов токов трёхфазного перемешивателя позволяет генерировать в жидком металле вихревые течения различной топологии, в частности, изменять количество крупномасштабных вихрей или подавлять крупномасштабное течение. Влияние гидродинамических потоков изменяет форму фронта кристаллизации, предоставляя возможность управления однородностью затвердевания металла посредством изменения характеристик питания индуктора. Важно отметить, что изменение фазных углов токов при сохранении амплитуды питания не оказывает существенного влияния на темп кристаллизации, что открывает широкие возможности контроля процессов за счет изменения как силы тока, так и фазных углов. В рамках работы был успешно применён и верифицирован по измерениям датчиками ультразвукового анемометра температурный метод определения положения фронта кристаллизации. Показано, что при наличии развитых течений в жидкой среде термодатчики обеспечивают хорошее согласие (вплоть до единиц процентов) измеренных положений и геометрической формы фронта кристаллизации с данными ультразвуковых измерений. В отсутствие перемешивания жидкой фазы разница между данными термодатчиков и ультразвуковых измерений несколько возрастает. Тем не менее даже в этом случае термодатчик позволяет корректно определять положение и скорость продвижения фронта кристаллизации.

© ПНИПУ

© Лосев Геннадий Леонидович – к.ф.-м.н., м.н.с., e-mail: losev.g@icmm.ru.
Мамыкин Андрей Дмитриевич – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: mad@icmm.ru.

Gennadiy L. Losev – CSc of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher, e-mail: losev.g@icmm.ru.
Andrey D. Mamykin – CSc of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: mad@icmm.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ANALYSIS OF THE FORM AND EVOLUTION OF THE SOLID PHASE DURING DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION OF NON-FERROUS METALS WITH ELECTROMAGNETIC INFLUENCE BY ULTRASONIC AND TEMPERATURE METHODS

G.L. Losev, A.D. Mamykin

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 June 2022
Approved: 05 December 2022
Accepted for publication:
12 December 2022

Keywords:

crystallization, phase transition, liquid metal, traveling magnetic field, ultrasonic Doppler velocimetry, convection, measurement methods, signal analysis, linear induction machine, electromagnetic stirring.

ABSTRACT

The paper is devoted to the experimental study of new mechanisms of controlling the process of directional crystallization of non-ferrous metals. The focus of the study is on the development and testing of measuring techniques applicable both to laboratory modeling and to processes under real operating conditions. The mechanism of controlling the rate and homogeneity of crystallization of a metal melt by changing the phase angles between the supply currents of a traveling magnetic field induction stirrer is proposed. This makes it possible to generate vortex flows of various topologies in the liquid metal, in particular, to change the number of large-scale vortices or to suppress the large-scale flow. It is shown that the hydrodynamic flows have an impact on the crystallization front shape, which allows one to control the homogeneity of metal solidification by changing the characteristics of the power supply of the inductor. It is important to note that a change in the phase angles of the currents while maintaining the supply amplitude does not significantly affect the crystallization rate, which opens up wide possibilities for controlling processes by changing both the current strength and the phase angles. The temperature method for determining the position of the crystallization front was successfully applied and verified by ultrasonic velocimetry measurements. It has been found that, in the presence of developed flows in a liquid medium, thermocouple measurements provide good agreement (up to a few percent) of the measured position and geometric shape of the crystallization front with the ultrasonic measurement data. In the absence of liquid phase stirring, the difference between the thermocouple and ultrasonic measurements increases slightly. Nevertheless, even in this case, the thermocouple method can be used to correctly determine the position and velocity of the crystallization front.

© PNRPU

Введение

Процессы кристаллизации расплавов металлов и полупроводников характеризуются комплексом разнообразных физических явлений, в совокупности определяющих структурные особенности и механико-прочностные характеристики изделий. Одним из важнейших факторов, влияющих на структуру кристаллической фазы, являются течения, возникающие в жидкой фазе слитка в процессе затвердевания [1]. Топология таких течений, очевидно, должна влиять на процессы, протекающие при его кристаллизации. Например, в случае цилиндрической геометрии азимутальное перемешивание расплава приводит к однородному распределению вводимых добавок, а также ломке дендритов на фронте кристаллизации расплава. Возбуждение меридиональных течений улучшает перемешивание вводимых компонентов и влияет на форму границы «расплав – твердая фаза» [2–6].

В отсутствие внешнего принудительного перемешивания основным источником течений, влияющих на тепломассоперенос, является свободная тепловая конвекция, возникающая под действием перепада температур между жидкой и твердой фазами [7; 8]. Во многих случаях влияние конвективных течений оказывается негативным, поскольку неконтролируемым образом изменяет условия теплообмена в области кристаллиза-

ции расплава [9–11]. В то же время конвективные течения оказываются недостаточно интенсивными для желательного перемешивания при отливке изделий из металлов.

Для подавления паразитных конвективных течений и (или) усиления желательных используется принудительное перемешивание. В силу электропроводности расплавов металлов и полупроводников возможен бесконтактный электромагнитный метод генерации течений в жидкой фазе. Под воздействием внешнего переменного электромагнитного поля в проводящей среде возникают вихревые токи. Взаимодействие этих токов с исходным полем приводит к возникновению объёмной силы. Если проводящая среда является текучей, то данная сила порождает вихревые течения жидкости, топология которых определяется топологией электромагнитного воздействия [12–17].

Широкое распространение в металлургии получило применение бегущего (БМП) и вращающегося (ВМП) магнитных полей. Суть обоих методов сводится к генерации интегральной средней силы, толкающей расплав за счёт последовательного изменения фазы переменных магнитных полей разнесенных в пространстве катушек (как правило связанных общим магнитопроводом). Управление топологией и интенсивностью генерируемых течений осуществляется путём вариации амплитуды и частоты питающих индуктор токов.

Мы предлагаем новый способ опосредованного управления процессом кристаллизации металлического расплава посредством изменения фазных углов токов питания линейного индукционного перемешивателя. Изменение распределения фаз переменных магнитных полей отдельных катушек вдоль индуктора изменяет топологию электромагнитных сил в рабочей жидкости и открывает широкие возможности для управления структурой течений [18].

Высокие температуры плавления и химическая активность подавляющего числа металлических расплавов в значительной мере ограничивают спектр экспериментальных методик, доступных для изучения МГД-процессов. Мы моделируем процессы перемешивания на легкоплавком галлиевом сплаве. Данный сплав обладает рядом преимуществ, делающих его идеальной средой для изучения МГД-процессов в лабораторных условиях. Сплавы на основе галлия сохраняют текучесть при комнатных температурах, нетоксичны (в отличие от ртути), химически малоактивны (в сравнении, например, с NaK), негорючи [19].

Одним из мощных методов измерений характеристик гидродинамических процессов, применимых в оптически непрозрачных средах, является ультразвуковая доплеровская анемометрия [20–23]. Этот метод позволяет измерять пространственные профили компоненты скорости, направленной вдоль ультразвукового луча, а также профили ультразвукового эха, связанные с фазовым составом среды. Тем не менее ультразвуковые измерения становятся невозможны в расплавах, применяемых в промышленности металлов, в силу высокой чувствительности пьезоэлементов ультразвуковых преобразователей к повышенным температурам. Ограниченный диапазон рабочих температур датчиков требует разработки новых методов измерений, применимых для анализа таких комплексных процессов, как управление направленной кристаллизацией, в реальных промышленных металлах (например, Al, Mg, Ti и др.). Ультразвуковой метод является прямым и потому может быть использован для верификации косвенных измерений [24; 25].

Удобный инструментарий для анализа темпа и однородности кристаллизации предоставляют локальные измерения температуры при помощи плотной сетки термопар. Термопары во многом лишены ограничений пьезоэлементов и могут быть использованы в дальнейшем для изучения процессов в средах, нагретых до высоких температур. Поэтому целью данной работы является разработка и апробация методики измерения темпа и формы фронта кристаллизации в процессе затвердевания металлического расплава, находящегося под внешним электромагнитным воздействием.

1. Методология

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой плоский вертикальный слой жидкого металла, размещенный над индуктором линейной индукционной машины (ЛИМ) 1. Жидкий металл заключен в кю-

вету 2 из стеклотекстолита. С торцевых сторон слоя размещаются медные теплообменники 3, подключенные через систему вентиляей к криотермостатам КРИО ВТ-1. Кювета оборудована вставной стенкой 4, в которой размещен набор малоинерционных термопар. Измерения скорости течения жидкого металла производятся при помощи пяти датчиков TR0408LS ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 2000, Signal Processing, Switzerland [26]. Датчики располагаются в пазах медной стенки 5 таким образом, что ультразвуковые лучи направлены вдоль слоя по оси X . С внешней стороны кювета теплоизолирована слоем стекловаты. Размеры рабочей полости кюветы $420 \times 20 \times 100$ мм³. Планарные размеры ЛИМ 480×350 мм². Магнитное поле генерируется шестью катушками по 170 витков в каждой. Питание ЛИМ осуществляется от трёхфазного программируемого источника Pacific Smart Source 360 ASX-UPC3 3, позволяющего задавать напряжения и фазные углы каждой из фаз, контролировать силу и частоту тока. Несущая частота магнитного поля составляла 50 Гц.

Теплообменники создают в слое жидкого металла горизонтальный градиент температуры вдоль оси X . Торцевая поверхность теплообменников, находящаяся в контакте с жидким металлом, облужена галлием для обеспечения наилучшего теплового контакта между жидкостью и теплообменниками. Температура горячего теплообменника составляет $+18^\circ\text{C}$, температура холодного составляет -30°C .

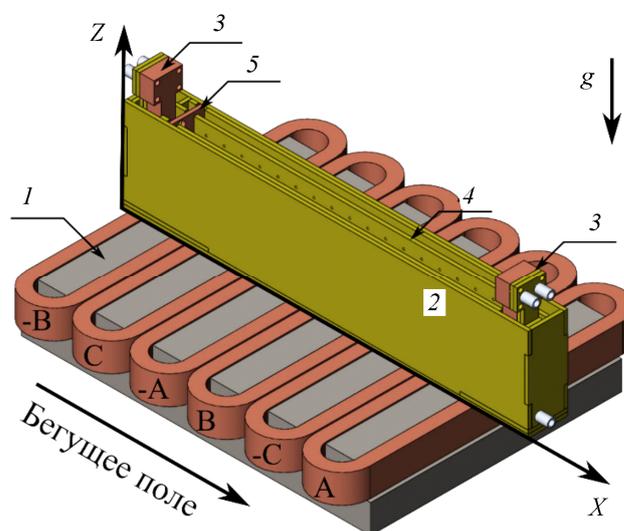


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ЛИМ; 2 – ячейка из стеклотекстолита; 3 – теплообменники; 4 – вставная стенка; 5 – медная стенка. Направление БМП указано длинной черной стрелкой вблизи индуктора, направление силы тяжести отмечено короткой стрелкой g . Заглавными буквами на катушках отмечены фазы токов питания

Fig. 1. Sketch of the experimental setup: 1 – LIM; 2 – fiberglass cell; 3 – heat exchangers; 4 – false wall; 5 – copper wall. The direction of the TMF is indicated by a long black arrow near the inductor, the direction of gravity is indicated by a short arrow g . The capital letters on the coils indicate the phases of the supply currents

В качестве рабочей жидкости используется сплав $Ga_{86.3}Zn_{10.8}Sn_{2.9}$ (вес. %). Физические свойства сплава при комнатной температуре: плотность 6256 кг/м^3 , коэффициент объёмного теплового расширения $9,63 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, кинематическая вязкость $3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, проводимость $3,56 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, скорость звука в среде 2870 м/с , температура плавления сплава $+17 \text{ }^\circ\text{C}$. Более подробно свойства сплава см. в [19; 27].

Измерения скорости проводятся при помощи УДА. Принцип действия прибора основывается на излучении ультразвуковых волновых пакетов в жидкую среду, последующим их отражением от движущихся вместе со средой частиц и приёме отраженного эхо. Сдвиг частот между излученным и принятым волновыми пакетами пропорционален скорости движения звукоотражающих частиц в соответствии с эффектом Допплера. Наличие таких частиц в жидкости является обязательным требованием для данного метода, размеры не должны превышать длину ультразвуковой волны. При этом концентрация частиц должна быть достаточно малой, чтобы преобладающим механизмом процесса было отражение, а не рассеяние ультразвуковых волн. В сплавах на основе галлия такими частицами служат оксиды галлия. Контакта сплава с атмосферой в течение одной минуты оказывается достаточно для достижения необходимой концентрации оксидных частиц. Характерные размеры частиц – от единиц до десятков микрон, длина звуковых волн порядка 700 мкм .

Локализация положения фронта кристаллизации производится при помощи УДА. На границе раздела фаз (например «жидкость – твердое тело») происходит скачок акустического сопротивления (произведения плотности среды на скорость звука). При прохождении через границу раздела фаз происходят множественные переотражения волновых пакетов, что выражается в виде локального максимума на пространственном профиле эхо. Положение этого локального максимума соответствует положению границы раздела фаз, в данном случае положению фронта кристаллизации [28–30]. Анализ профилей ультразвукового эхо позволяет восстановить положение и форму фронта кристаллизации в каждый момент времени по данным 5 датчиков УДА.

На рис. 3 приведён пример пространственных профилей продольной компоненты скорости течения и ультразвукового эхо в заданный момент времени. Красными вертикальными линиями отмечены границы области фазового перехода. В этой области происходит увеличение интенсивности ультразвукового эхо в силу множественных переотражений. Продольная компонента скорости обращается в ноль в выделенной области в силу поворота потока на твёрдой границе раздела фаз. Синей вертикальной линией на рисунке отмечено положение границы раздела фаз, найденное с использованием алгоритма поиска локальных максимумов. Локальный максимум на профиле эхо в области $x \approx 400 \text{ мм}$ обусловлен наличием медного теплообменника и переотражениями ультразвука на границе «твёрдый галлие-

вый сплав – медная стенка». При этом профиль скорости в области за границей раздела фаз (правее синей линии на рисунке) не имеет физического смысла, и рассчитывается УДА на основе вторичных отражений ультразвука.

Вторым методом контроля процессов, происходящих в слое металла, является анализ данных температурных датчиков. Во вставной стенке кюветы расположены два набора малоинерционных термопар с диаметром термоспая $\approx 0,5 \text{ мм}$, как показано на рис. 2. Термопары, расположенные по длине кюветы, служат для определения скорости продвижения фронта кристаллизации в разные моменты времени, в то время как ряд термопар, расположенных по высоте слоя, позволяет определить его форму.

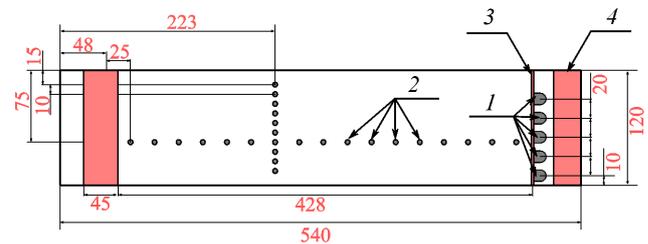


Рис. 2. Схема расположения ультразвуковых и термопарных датчиков в слое: 1 – датчики УДА; 2 – термопары; 3 – медная стенка; 4 – теплообменник. Цветные подписи отображают пространственные размеры установки (мм)

Fig. 2. Sketch of ultrasonic and thermocouple sensors in the layer: 1 – UDV sensors; 2 – thermocouples; 3 – copper wall; 4 – heat exchanger. Color labels display the spatial dimensions of the setup (mm)

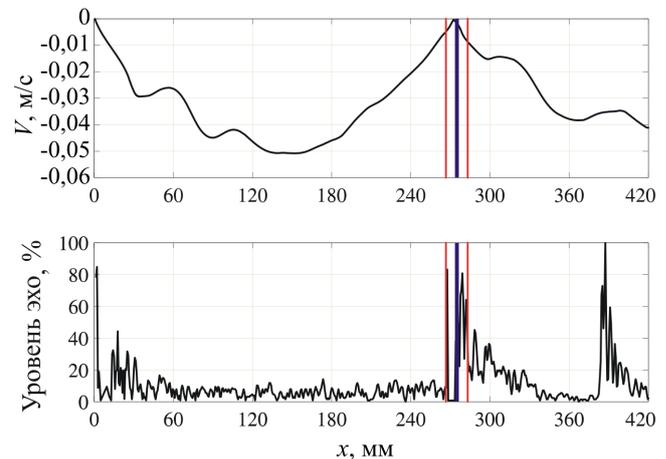


Рис. 3. Пространственные профили скорости течения (сверху) и ультразвукового эхо (снизу) в конкретный момент времени, полученные при помощи УДА. Красные линии отмечают границу области фазового перехода, синей линией отмечено положение фронта кристаллизации, определенное в ходе анализа профиля эхо

Fig. 3. Spatial profiles of velocity (top) and ultrasonic echo (bottom) at a specific moment of time, obtained using UDV. The red lines mark the boundary of the phase transition region, the blue line marks the position of the crystallization front, determined during the analysis of the echo profile

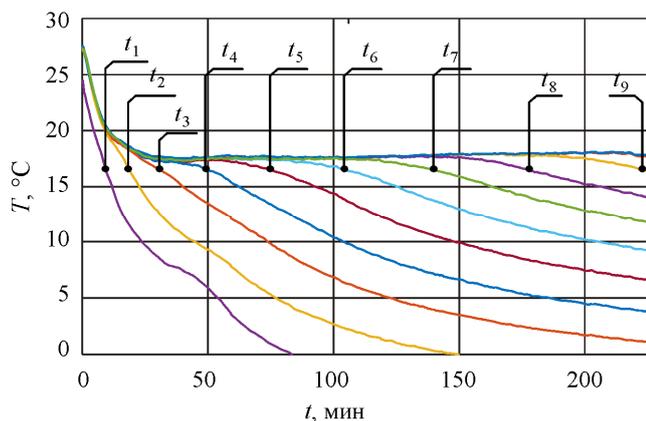


Рис. 4. Эволюции температуры жидкого металла на термопарах вдоль кюветы с указанием моментов времени кристаллизации

Fig. 4. Evolution of the liquid metal temperature on a thermocouple along the sell with indication of crystallization time points

Для получения данных о скорости движения фронта кристаллизации вдоль слоя жидкого металла достаточно знать расстояние d между термопарами и определять моменты времени t_i , в которые происходит кристаллизация объёма вблизи i -й термопары. Как видно из рис. 4, большинство кривых эволюции температуры имеют сходный вид: быстрое снижение от температуры окружающей среды до температуры солидуса, участок плато и плавное снижение, свидетельствующее об окончании процесса кристаллизации в объёме вблизи термопары. Момент кристаллизации может быть найден по отклонению от нуля производной по времени температурного ряда (взятого с начала плато), но на первых трёх термопарах такого плато не наблюдается во всех рассмотренных режимах вследствие быстрого продвижения фронта в начале процесса кристаллизации. Возможно применение иного метода, при котором используется пороговая температура ниже точки кристаллизации. Достижение этой температуры считается достаточным условием для гарантированной кристаллизации металла. Второй метод, очевидно, применим для всех кривых на рис. 4, вне зависимости от наличия участка плато. Второй метод позволяет более точно оценить скорость кристаллизации за счёт снижения точности определения положения фронта кристаллизации. Мы использовали данный метод, установив значение пороговой температуры равным $16,5\text{ }^\circ\text{C}$. Скорость движения фронта кристаллизации в моменты времени $(t_i + t_{i+1})/2$, $i = 1..8$ рассчитывалась по формуле (1):

$$U_i = \frac{d}{t_{i+1} - t_i}. \quad (1)$$

Для того, чтобы восстановить форму фронта кристаллизации, находились моменты времени кристаллизация объёма вблизи термопар, расположенных вдоль оси Z , по методике, описанной выше. Также для каждой термопары вычислялась средняя скорость движения фронта вблизи вертикального ряда термопар. Искомые

координаты x_k , $k = 1..8$ положения фронта кристаллизации вычислялись по формуле (2):

$$x_k = \frac{U_5 + U_6}{2} (t_k - t_1). \quad (2)$$

Для описания внешних силовых воздействий введём безразмерные критерии задачи: число Грасгофа Gr , безразмерную интегральную силу, действующую на металл со стороны бегущего магнитного поля F , и силовой параметр N , определяемый как отношение F/Gr .

В условиях температурной неоднородности в текущей среде может возникать тепловая конвекция. Необходимым условием для возникновения конвективных течений является наличие ненулевого угла между градиентом температуры в жидкости и направлением силы тяжести [7]. Интенсивность существующего течения зависит от величины перепада температуры, линейных размеров жидкого объёма и физических свойств самой жидкости, и может в обобщенном безразмерном виде характеризоваться числом Грасгофа (3):

$$Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести, β – коэффициент теплового расширения среды, L – линейный размер задачи, ν – кинематическая вязкость жидкости и $(T_h - T_c)$ – перепад температуры между нагревателем (T_h) и холодильником (T_c).

Согласно [13; 14], величина планарной толкающей силы, действующей со стороны бегущего магнитного поля на проводящую среду, может быть выражена по формуле (4)

$$F_x = \frac{\sigma\omega\tau B_0^2}{2\pi h}, \quad (4)$$

где B_0 – величина индукции магнитного поля, ω – циклическая частота тока в индукторе бегущего магнитного поля, τ – шаг полюсов индуктора и h – толщина слоя проводника, по которой выполняется осреднение силы.

По аналогии с числом Грасгофа можно ввести безразмерный силовой критерий F , определяемый соотношением (5):

$$F = \frac{F_x L^3}{\rho\nu^2}. \quad (5)$$

Безразмерный критерий $N = F/Gr$ характеризует отношение сил электромагнитного перемешивания к силам, вызывающим свободно конвективный механизм перемешивания, и является безразмерным управляющим параметром задачи.

2. Результаты

Под действием горизонтального градиента температуры металлический расплав претерпевает фазовый переход. Как уже отмечалось выше, в отсутствие внешнего

перемешивания условия кристаллизации металла определяются свободно-конвективными потоками. Внешнее силовое воздействие изменяет условия теплообмена за счёт принудительного перемешивания жидкости. На рис. 5, а, приведены формы профилей кристаллизации, найденные при помощи ультразвукового и термодатного методов для различных режимов перемешивания жидкого металла внешним бегущим магнитным полем контролируемой интенсивности.

Значение силового параметра $N = 0$ отмечает режим, при котором перемешивание происходит исключительно за счёт тепловой конвекции (ЛИМ бездействует). Значения N , отличные от нуля, соответствуют разным величинам тока в обмотках ЛИМ и, соответственно, амплитуды бегущего магнитного поля.

Видно, что хорошее соответствие данных косвенного термодатного и прямого ультразвукового методов определения положения и формы фронта кристаллизации достигается при режимах принудительного перемешивания. В отсутствие перемешивания ($N = 0$) и при самом слабоинтенсивном вынужденном течении ($N = 500$) наблюдается расхождение показаний двух измерительных методик. По всей видимости, расхождение в показаниях двух методов обусловлено локальной кристаллизацией ограниченных объёмов галлиевого сплава около стенки в области расположения термодатных датчиков. Принудительное перемешивание предотвращает образование застойных зон с пониженной температурой, что приводит к лучшему совпадению термодатного метода с ультразвуковым.

Тем не менее даже в отсутствии принудительного перемешивания термодатный метод позволяет корректно определять темп кристаллизации металла. На рис. 5, б, представлены графики эволюции средней скорости движения фронта кристаллизации вдоль слоя для различных величин внешнего силового воздействия. Хорошо видно не только качественное, но и количественное согласие величин скоростей, найденных двумя методами. Кривые, соответствующие ультразвуковым измерениям, получены по датчику, который измеряет положение фронта кристаллизации по координате Z в области, наиболее близкой к расположению по этой же оси продольного ряда термодат. Следует отметить, что отмеченные на графиках разбросы ультразвуковых данных обусловлены различными показаниями по высоте слоя (с разных датчиков) и рассчитываются как среднеквадратичное отклонение скорости движения фронта от среднего по пяти значениям (по высоте).

Наибольшая неоднородность фронта кристаллизации по высоте (см. рис. 5, а) наблюдается при $N = 0$, т.е. даже слабое перемешивание повышает однородность фронта кристаллизации, что согласуется с известными данными.

Изменение топологии объёмных сил и, как следствие, топологии возникающих в жидкой фазе течений возможно и посредством вариации фаз токов питания индуктора при неизменной их амплитуде. Мы рассмат-

риваем несколько вариантов питания индуктора, обеспечивающих генерацию течений с различным количеством вихрей (мелкомасштабное многовихревое течение при $\varphi_{AB} = 0^\circ$, $\varphi_{BC} = 0^\circ$, малоинтенсивное четырёхвихревое течение при $\varphi_{AB} = 0^\circ$, $\varphi_{BC} = 210^\circ$, трёхвихревое течение при $\varphi_{AB} = 240^\circ$, $\varphi_{BC} = 0^\circ$, два крупномасштабных вихря при $\varphi_{AB} = 270^\circ$, $\varphi_{BC} = 300^\circ$, один крупномасштабный вихрь, охватывающий весь слой при $\varphi_{AB} = 120^\circ$, $\varphi_{BC} = 240^\circ$, и вихрь с реверсной закруткой при $\varphi_{AB} = 120^\circ$, $\varphi_{BC} = 90^\circ$), обеспечивающих подавление крупномасштабных течений при сохранении мелкомасштабного перемешивания [18].

Переходя к анализу формы фронта кристаллизации (рис. 6, а), можно утверждать, что наибольшую однородность процесса обеспечивают режимы внешнего воздействия с фазовым набором $\varphi_{AB} = 0^\circ$, $\varphi_{BC} = 0^\circ$ и $\varphi_{AB} = 120^\circ$, $\varphi_{BC} = 90^\circ$, соответствующие пульсирующему магнитному полю и мелкомасштабному перемешиванию и реверсивному крупномасштабному одновихревому течению соответственно. Во втором случае вынужденное течение направлено против конвективного потока и во многом компенсирует нежелательный тепломассоперенос.

На рис. 6, б, представлены зависимости средней скорости движения фронта кристаллизации вдоль слоя при различных режимах перемешивания жидкого металла. Наилучшее согласие данных двух методов наблюдается в режиме генерации мелкомасштабных течений пульсирующим полем ($\varphi_{AB} = 0^\circ$, $\varphi_{BC} = 0^\circ$). Тем не менее во всех рассмотренных режимах термодатные измерения позволяют корректно измерить средние скорости продвижения фронта кристаллизации и общие тенденции её эволюции.

Заключение

Было рассмотрено влияние амплитуды и топологии магнитного поля трёхфазного индукционного перемешивателя на процесс направленной кристаллизации металлического расплава. Найден темп и однородность кристаллизации в зависимости от параметров магнитного поля.

Изменение интенсивности электромагнитного воздействия позволяет существенно изменять темп кристаллизации и влиять на форму образующейся твердой фазы, что является интуитивно понятным и известным фактом. Интерес представляет воздействием магнитных полей более сложной топологии при постоянстве величины воздействия. Изменение фазных углов токов трёхфазного перемешивателя позволяет генерировать в жидком металле вихревые течения различной топологии, в частности, изменять количество крупномасштабных вихрей или подавлять крупномасштабное течение. Влияние гидродинамических потоков изменяет форму фронта кристаллизации, предоставляя возможность управления однородностью затвердевания металла

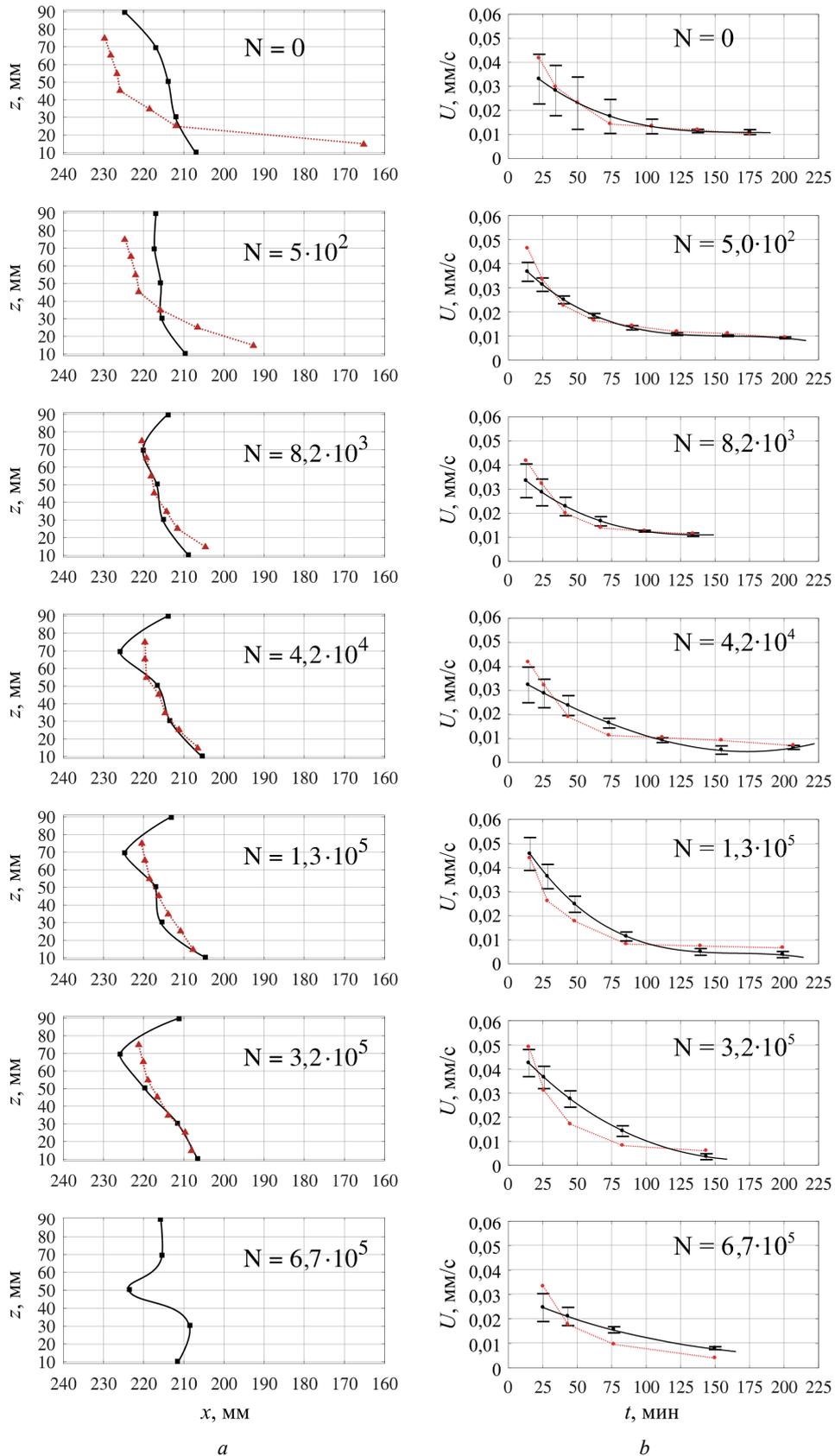


Рис. 5. Форма фронта кристаллизации (a) и изменение среднего темпа кристаллизации со временем (b), измеренные при помощи УДА (черная сплошная линия) и термопарных датчиков (красная пунктирная линия), при различных значениях параметра силового воздействия

Fig. 5. The crystallization front shape (a) and the change in the average crystallization rate with time (b), measured using UDV (solid black line) and thermocouple sensors (red dotted line) at different values of the force parameter

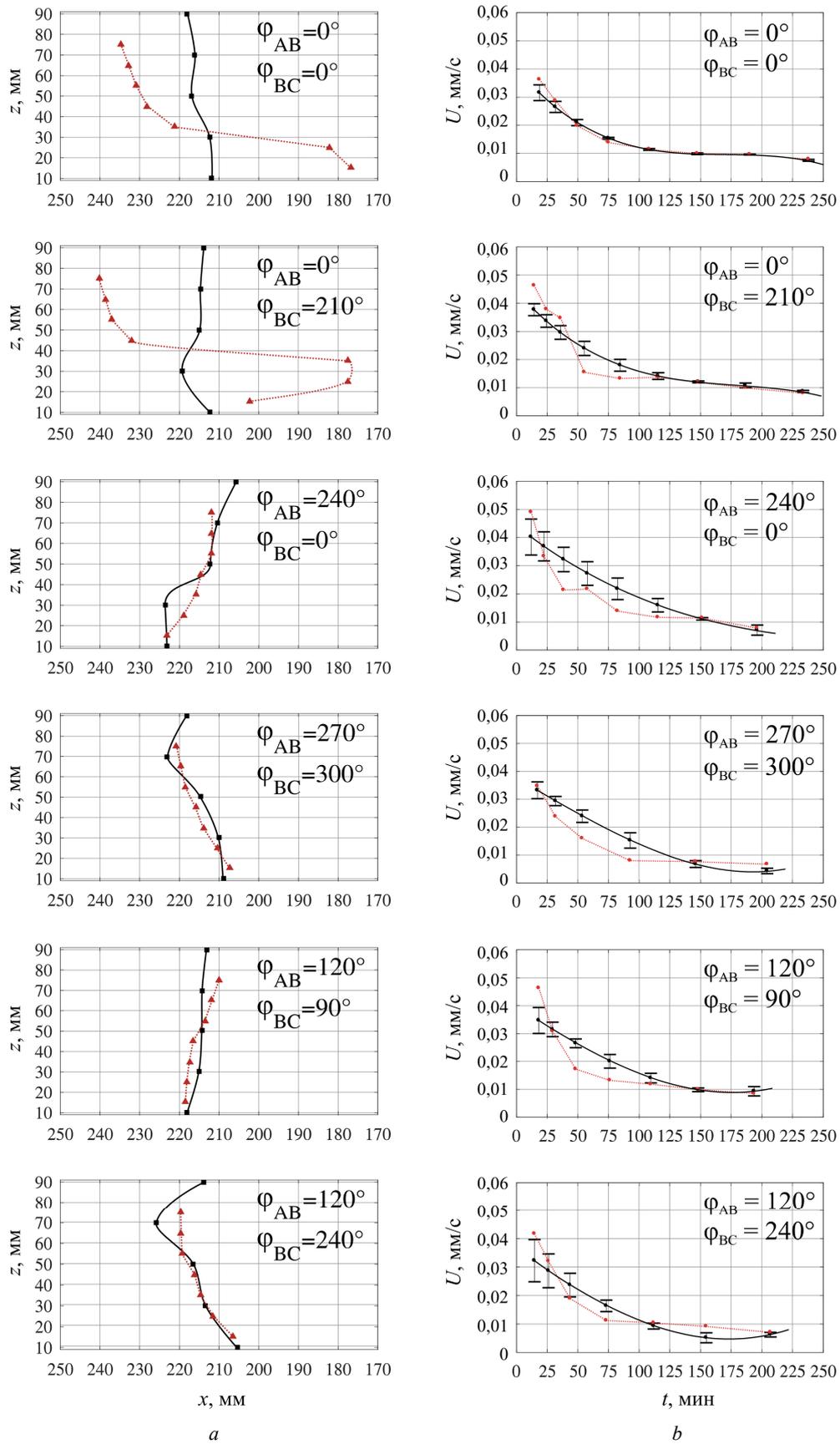


Рис. 6. Форма фронта кристаллизации (a) и изменение среднего темпа кристаллизации со временем (b), измеренные при помощи УДА (черная сплошная линия) и термопарных датчиков (красная пунктирная линия), при различных значениях фаз токов питания
 Fig. 6. The crystallization front shape (a) and the change in the average crystallization rate with time (b), measured using UDV (solid black line) and thermocouple sensors (red dotted line) at different values of current phases

посредством изменения характеристик питания индуктора. Важно отметить, что изменение фазных углов токов при сохранении амплитуды питания не оказывает существенного влияния на темп кристаллизации, что открывает широкие возможности контроля процессов за счет изменения как силы тока, так фазных углов.

Был успешно применён и верифицирован по измерениям датчиками ультразвукового анемометра температурный метод определения положения фронта кристаллизации.

Библиографический список

1. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и химическую неоднородность сортовой непрерывной заготовки / А.Б. Великий, А.С. Казаков, В.П. Филипова, А.Г. Алексеев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – Т. 4. – С. 37–40.
2. Формирование структуры небольших Al слитков под магнито-гидродинамическим воздействием / С.Ю. Хрипченко, Л.В. Никулин, В.М. Долгих, С.А. Денисов // *Металлургия машиностроения*. – 2013. – Т. 2. – С. 12–16.
3. Fluid flow and free surface phenomena in rotary electromagnetic stirring of metallic melt / J. Partinen, J. Szekely, C. Vives, L. Holappa // *ISIJ Intern.* – Vol. 3. – P. 292–301.
4. A stirring history / R. Fdhila, J. U. Sand, E. Eriksson, H. Yang // *ABB Review*. – 2016. – Vol. 3.
5. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact / M. Avnaim, B. Mikhailovich, A. Azulay, A. Levy // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2018. – Vol. 69. – P. 23–32.
6. Avnaim M., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 2: Acting forces ratio and solidification parameters, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2018. – Vol. 69. – P. 9–22.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1972. – 392 с.
8. Lappa M. *Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability*. – John Wiley & Sons. – 2009.
9. Gau C., Viskanta R. Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall // *Journal of Heat Transfer*. – 1986. – Vol. 108, № 1. – P. 174–181.
10. Wang X., Moreau R.J.E., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part I. Experiments with GaInSn // *Metall. Mater. Trans.* – 2008. – Vol. 40. – P. 82.
11. Wang X., Moreau R.J.E., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part II. Theoretical model // *Metall. Mater. Trans.* – 2009. – Vol. 40. – P. 104–113.
12. Шерклиф. Д. Теория электромагнитного измерения расхода. – М.: Мир, 1965.
13. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part I. theory and experiments with cold models / M. Dubke, K.-H. Tacke, K.-H. Spitzer, K. Schwerdtfeger // *Metallurgical Transactions B*. – 1988. – Vol. 19, № 4. – P. 581–593.
14. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part II. computation of flow fields in billets, blooms, and slabs of steel / M. Dubke, K.-H. Tacke, K.-H. Spitzer, K. Schwerdtfeger // *Metallurgical Transactions B*. – 1988. – Vol. 19, № 4. – P. 595–602.
15. Электровихревые течения / В. Бояревич, Я. Фрейберг, Э. Шилова, Э. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1985.
16. Хрипченко С. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
17. Moffatt H.K. Electromagnetic stirring // *Phys. Fluids*. – 1991. – Vol. 3. – P. 1336–1343.
18. Adaptation of linear induction machine power supply to the tasks of liquid metal transportation and stirring / G. Losev, A. Mamykin, V. Eltishchev, I. Sokolov // *Magneto hydrodynamics*. – 2021. – Vol. 57, № 1. – P. 85–94.
19. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy / A. Dobosz, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk [et al.] // *Fluid Phase Equilibria*. – 2018. – Vol. 465. – P. 1–9.
20. Eckert S., Gerbeth G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry // *Experiments in Fluids*. – 2002. – Vol. 32. – P. 542–546.
21. Poelma C. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review // *Experiments in Fluids*. – 2017. – Vol. 58, № 3.
22. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium / D. Brito, H.-C. Nataf, P. Cardin, J. Aubert, J.-P. Masson // *Experiments in Fluids*. – 2001. – Vol. 31. – P. 653–663.
23. Takeda Y., Kikura H. Flow mapping of the mercury flow // *Experiments in Fluids*. – 2002. – Vol. 32. – P. 161–169.
24. Takeda Y. Development of an ultrasound velocity profile monitor // *Nuclear Engineering and Design*. – 1991. – Vol. 126. – P. 277–284.
25. Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows / R. Nauber, M. Burger, L. Butner [et al.] // *Eur. Phys. J. Special Topics*. – 2013. – Vol. 220. – P. 43–52.
26. Signal Processing (Switzerland). *Transducers Selection guide* [Электронный ресурс]. – URL: https://www.signal-processing.com/trans_select.php (дата обращения: 14.10.2022).
27. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields / O. Zikanov, I. Belyaev, Y. Listratov, P. Frick, N. Razuvanov, V. Sviridov // *Applied Mechanics Reviews*. – 2021. – Vol. 73.
28. Zhang C., Eckert S., Gerbeth G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2005. – Vol. 31, № 7. – P. 824–842.
29. Oborin P., Kolesnichenko I. Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // *Magneto hydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49, № 1–2. – P. 231–236.
30. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2020. – Vol. 75. – P. 101786.

References

- Velikiĭ A.B., Kazakov A.S., Fillipova V.P., Alekseev A.G. Vliianie ėlektromagnitnogo peremeshivaniia na strukturu i khimicheskuiu neodnorodnost' sortovoi nepreryvnoi zagotovki [Influence of electromagnetic stirring on the structure and chemical heterogeneity of billets]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2007. vol. 4, pp. 37–40.
- Khripchenko S.Iu., Nikulin L.V., Dolgikh V.M., Denisov S.A. Formirovanie struktury nebol'shikh Al slitkov pod magnito-gidrodinamicheskim vozdeistviem [Structure formation of small Al ingots under magnetohydrodynamic influence]. *Metallurgĭia mashinostroeniia*. – 2013. – vol. 2. – pp. 12–16.
- Partinen J., Szekely J., Vives C., Holappa L. Fluid flow and free surface phenomena in rotary electromagnetic stirring of metallic melt. *ISIJ Intern*, Vol. 3, pp. 292–301.
- Fdhila R., Sandj U., Eriksson E., Yang H. A stirring history. *ABB Review*, 2016, Vol. 3.
- Avnaim M., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2018, Vol. 69, pp. 23–32.
- Avnaim M., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 2: Acting forces ratio and solidification parameters. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2018, Vol. 69, pp. 9–22.
- Geršuni G.3., Zhukhoviĭskiĭ E.M. Konvektivnaia ustoichivost' neszhimaemoi zhidkosti [Convective stability of an incompressible fluid]. *Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva «Nauka»*, 1972, pp. 392.
- Lappa M., Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability. *John Wiley & Sons*. – 2009.
- Gau C., Viskanta R. Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall. *Journal of Heat Transfer*, 1986, Vol. 108, no. 1, pp. 174–181.
- Wang X., Moreau R., J E., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part I. Experiments with GaInSn. *Metall. Mater. Trans*, 2008, vol. 40, pp. 82.
- Wang X., Moreau R., J E., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part II. Theoretical model. *Metall. Mater. Trans.*, 2009., Vol. 40., pp. 104–113.
- Sherklif. D. Teoriia ėlektromagnitnogo izmereniia raskhoda [Theory of electromagnetic flow measurement], *Mir*, 1965.
- Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part I. theory and experiments with cold models. *Metallurgical Transactions B*, 1988, Vol. 19, no. 4. pp. 581–593.
- Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part II. computation of flow fields in billets, blooms, and slabs of steel. *Metallurgical Transactions B*, 1988, Vol. 19, no. 4, pp. 595–602.
- Boiarevich V., Freĭberg Ia., Shilova Ė., Shcherbinin Ė. Ėlektrovikhrevye techeniia [Electrovortex flows]. *Riga: Zinatne*, 1985.
- Khripchenko S. Ėlektrovikhrevye techeniia v kanalakh MGD-ustroĭstv [Electrovortex flows in the channels of MHD devices]. *Ekaterinburg: UrO RAN*, 2009.
- Moffatt H.K. Electromagnetic stirring. *Phys. Fluids*, 1991, Vol. 3, pp. 1336–1343.
- Losev G., Mamykin A., Eltishchev V., Sokolov I. Adaptation of linear induction machine power supply to the tasks of liquid metal transportation and stirring. *Magnetohydrodynamics*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 85–94.
- Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V. et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy. *Fluid Phase Equilibria*, 2018, vol. 465, pp. 1–9.
- Eckert S., Gerbeth G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, pp. 542–546.
- Poelma C. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review. *Experiments in Fluids*, 2017, Vol. 58, № 3.
- Brito D., Nataf H.-C., Cardin P., Aubert J., Masson J.-P. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium. *Experiments in Fluids*, 2001, vol. 31, pp. 653–663.
- Takeda Y., Kikura H. Flow mapping of the mercury flow. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, p. 161–169.
- Takeda Y. Development of an ultrasound velocity profile monitor. *Nuclear Engineering and Design*, 1991, vol. 126, pp. 277–284.
- Nauber R., Burger M., Butner L. et al. Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2013, vol. 220, pp. 43–52.
- Signal Processing (Switzerland). Transducers Selection guide. – URL: https://www.signal-processing.com/trans_select.php
- Zikanov O., Belyaev I., Listratov Y., Frick P., Razuvanov N., Sviridov V. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields. *Applied Mechanics Reviews*, 2021, vol. 73.
- Zhang C., Eckert S., Gerbeth G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, vol. 31, no. 7, pp. 824–842.
- Oborin P., Kolesnichenko I. Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid. *Magnetohydrodynamics*, 2013, vol. 49, no. 1–2, pp. 231–236.
- Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, vol. 75, pp. 101786.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Президента № МК-5936.2021.1.2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The work was supported by the President's grant No. МК-5936.2021.1.2.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.