

УДК 537.31, 537.85, 536.421.4
PACS 07.07.Df

Индукционный метод локализации фронта кристаллизации

Г. Л. Лосев, В. А. Ельтищев*

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

*Eltishchev.V@icmm.ru

Работа посвящена разработке и тестированию индукционного датчика для определения положения фронта кристаллизации электропроводящих расплавов. Действие датчика основывается на принципе вихретокового преобразователя. Проведено сравнение индукционного и ультразвукового методов локализации фронта кристаллизации галлиевого сплава на модельной задаче направленной кристаллизации жидкого металла в плоском вертикальном слое. Описаны принципы индукционного метода, показана его применимость и найдена погрешность измерений.

Ключевые слова: электромагнитные датчики; направленная кристаллизация; методы измерений

Поступила в редакцию 01.03.2023; после рецензии 13.03.2023; принята к опубликованию 13.03.2023

Induction method of the solidification front localization

G. L. Losev, V. A. Eltishchev*

¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

*Eltishchev.V@icmm.ru

The paper describes the development and testing of an inductive sensor designed for determining the position of the solidification front of electrically conductive melts. The operation of the sensor is based on the eddy current transducer principle. We compared induction and ultrasonic methods of localizing the solidification front of a gallium alloy on a model problem of directional solidification of liquid metal in a flat vertical layer. The principles of the induction method are described, its applicability is shown, the measurement error has been found.

Keywords: electromagnetic sensors; directional solidification; measurement methods

Received 01 January 2023; revised 13 March 2023; accepted 13 March 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-57-61

1. Введение

Литьё жидких металлов является сложным металлургическим процессом. Качество отливок в значительной мере зависит от условий литейного производства. Наряду с этим, перемешивание расплава в ходе затвердевания повышает не только качество отливок, но и механико-прочностные характеристики изделий за счёт измельчения зерна металла и равномерного распределения примесных частиц (оксидов, солей и пр.) [1, 2].

Лабораторное изучение процессов затвердевания металлов связано с рядом технологических и методологических сложностей. Металлы оптически непрозрачны, что исключает применение широкого класса разработанных оптических методов измерения, например, PIV. Высокая химическая активность и температура плавления большинства металлических расплавов дополнительно усложняют работу с данными средами.

Наиболее доступными методами воздействия на жидкий металл и получения отклика со стороны внешних систем являются индукционные. В силу достаточно высокой электрической проводимости

металлов (как в твёрдом, так и в жидком агрегатном состоянии) воздействие посредством электромагнитных полей позволяет как приводить металл в движение, так и получать информацию о свойствах самого металла и его поведении.

Кроме того, индукционные методы обеспечивают возможность взаимодействия с разогретыми агрессивными средами без механического контакта, что обуславливает возможность их применения не только в лабораторных, но и промышленных установках, в отличие от сугубо исследовательской ультразвуковой анемометрии [3].

Мы предлагаем использовать индукционный метод, основанный на измерении электропроводности среды для исследования процессов фазовых превращений в металлических расплавах, в частности, определения положения фронта и темпа кристаллизации жидкого металла.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из управляемой подвижки 1, на каретке 2 которой размещен индукционный датчик 4. Движение каретки осуществляется за счёт дистанционно управляемого сервопривода 3 вдоль стенки кюветы 5, заполненной металлическим расплавом. На торцах кюветы расположены медные теплообменники 6, задающие горизонтальный градиент температуры в слое, определяющий процесс направленной кристаллизации.

Рабочая полость кюветы представляет собой прямоугольный параллелепипед и имеет размеры $420 \times 20 \times 100$ мм³. Полость заполнена эвтектическим сплавом Ga_{86,3}Zn_{10,8}Sn_{2,9} (вес. %). Физические свойства сплава при комнатной температуре: плотность 6256 кг/м³, коэффициент объёмного теплового расширения $9.63 \cdot 10^{-5}$ 1/К, кинематическая вязкость $3 \cdot 10^{-7}$ м²/с, проводимость $3.56 \cdot 10^6$ См/м, скорость звука в среде 2870 м/с, температура плавления сплава +17°C. Более подробно свойства сплава представлены в [4].

Торцевые теплообменники создают в слое горизонтальный градиент температуры 100 К/м. Нагреватель оборудован пазами для установки датчиков ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 5000, Signal Processing, Switzerland [5]. Пять датчиков УДА расположены вертикально друг над другом для измерения положения границы кристаллизовавшегося металла.

Разрабатываемый индукционный датчик (ИД) представляет собой три коаксиально намотанные катушки, расположенные последовательно на едином непроводящем каркасе [6].

Центральная катушка, которая является генерирующей, подключена к генератору переменной частоты ГЗ-109. Крайние катушки являются измерительными, их выводы подключены к цифровой измерительной плате National Instruments.

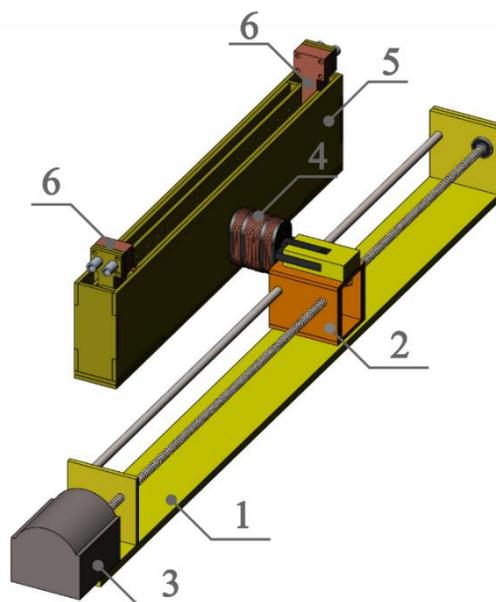


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – дистанционно управляемая подвижка, 2 – каретка подвижки, 3 – двигатель подвижки, 4 – индукционный датчик, 5 – канал, заполненный рабочим металлом, 6 – теплообменники

Принцип работы датчика основан на законе электромагнитной индукции Фарадея. На концах измерительных катушек, помещенных в переменное магнитное поле центральной генерирующей катушки, возникает ЭДС пропорциональная силе и частоте тока, питающего генерирующую катушку. Если рядом с датчиком находится объём электропроводящей среды, переменное магнитное поле центральной катушки так же будет порождать вихревые токи в данном объёме. Вихревые токи, в свою очередь, порождают переменное магнитное поле, которое по закону суперпозиции магнитных полей складывается с полем генерирующей катушки. Поскольку магнитное поле проводника с током затухает с расстоянием достаточно быстро, влияние наведенного поля вихревых токов на поля, детектируемые двумя измерительными катушками, неодинаково. В катушке, расположенной ближе к электропроводящему объёму, величина ЭДС будет меньше за счёт более сильного влияния вихревых токов, возникающих в электропроводящей среде. При этом интенсивность вихревых токов (и, как следствие, детектируемого магнитного поля) зависит от электропроводности среды. Таким образом, индукционный датчик позволяет косвенно измерять величину электропроводности сред, но требует калибровки, поскольку как абсолютные значения ЭДС, так и их разность зависят не только от электропроводности исследуемого вещества, но и от его формы (при постоянных величинах силы и частоты питающего генерирующую катушку тока). В более общем виде можно сказать, что величина

разности ЭДС измерительных катушек определяется эффективной электропроводностью объёма, охватываемого магнитным полем генерирующей катушки.

В рамках настоящей работы предлагается использовать данный принцип для неинвазивного определения положения границы раздела жидкость/твёрдое тело применительно к проблеме нахождения положения фронта кристаллизации металлического расплава. Исходя из существенных различий электропроводностей металлов в жидкой и твёрдой фазах, предполагается возможность определять фазу и её границы за счёт изменения уровня ЭДС при смещении датчика вдоль линии изменения фаз.

3. Результаты

В ходе эксперимента происходила направленная кристаллизация металлического расплава вдоль слоя. При этом производили измерения положения фронта кристаллизации при помощи датчиков УДА по ранее разработанной методике [7]. Параллельно производились измерения при помощи индукционного датчика.

Характерный пространственный профиль разности действующих значений ЭДС измерительных катушек индукционного датчика представляет собой два участка плато, соответствующих прохождению датчика вдоль участков с жидкой и твёрдой фазами металла (рис. 2). Одиночный пик на начальном участке профиля соответствует прохождению датчика вдоль области расположения медной пластины с датчиками УДА. Пластина обеспечивает точность топологии слоя, отсекая омываемый жидким металлом нагреватель с развитой поверхностью.

По всей видимости, снижение разности ЭДС U практически до нулевых значений в области $x = 5$ мм связано с плохим электрическим контактом между медной пластиной и жидким галлиевым сплавом, что приводит к изменению условий возникновения вихревых электрических токов и генерации соответствующих магнитных полей.

Аналогичная ситуация наблюдается и в области профиля при $x > 40$ мм, где снижение разности ЭДС может быть обусловлено ухудшением электрического контакта между рабочей средой и охлаждающим теплообменником.

Получение пространственного профиля разности ЭДС осуществлялось путём перемещения индукционного датчика вдоль слоя на подвижке. Время полного прохождения слоя датчиком не превышало 50 с.

Частота сбора данных составляла 25 кГц, а вычисление действующего значения производилось по 1000 точек. В силу малой скорости кристаллиза-

ции металла (порядка долей мм/с) изменением положения фронта кристаллизации за время измерения можно пренебречь.

Приведенные на рис. 2 профили разности ЭДС демонстрируют увеличение второго участка плато (в правой части графика) с течением времени по мере продвижения фронта кристаллизации и увеличение объёма твёрдой фазы.

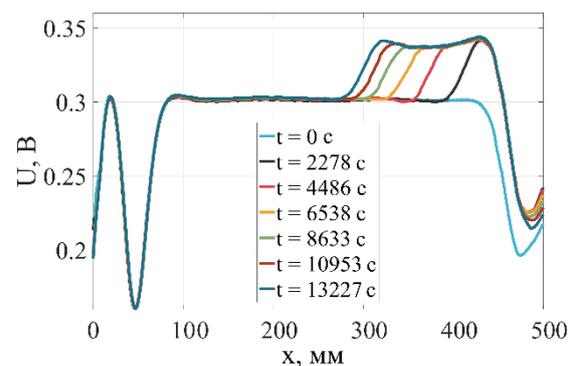


Рис. 2. Пространственные профили разности действующих значений ЭДС в измерительных катушках индукционного датчика в разные моменты времени

Поскольку в эксперименте жидкий металл претерпевает фазовый переход первого рода, то на границе раздела фаз происходит скачкообразное изменение главных параметров среды, в том числе и электропроводности. По аналогии с подходом Вандер-Ваальса [8] для выражения профиля плотности на границе раздела фаз, можно представить профиль электропроводности среды на границе раздела в виде:

$$\sigma(x) = \frac{\sigma_T + \sigma_{ж}}{2} + \frac{\sigma_T - \sigma_{ж}}{2} \tanh\left(\frac{2x}{D}\right), \quad (1)$$

где σ_T и $\sigma_{ж}$ — электропроводность твердой и жидкой фазы сплава, соответственно, D — толщина слоя межфазного перехода ($x = 0$ — граница раздела фаз).

Так как в ходе выполнения эксперимента определяется разность ЭДС измерительных катушек, которая характеризует эффективную электропроводность, то можно написать

$$U(x) = \frac{U_T + U_{ж}}{2} + \frac{U_T - U_{ж}}{2} \tanh\left(\frac{2(x-x_0)}{D}\right), \quad (2)$$

где U_T и $U_{ж}$ — разность ЭДС для твердой и жидкой фазы сплава, соответственно, x_0 — координата границы раздела фаз.

Как видно из рис. 3, предложенная выше зависимость $U(x)$ хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. При $x = x_0$ получаем значение ЭДС на границе раздела твердой и жидкой фаз, которое определяется соотношением

$$U(x_0) = \frac{U_T + U_{ж}}{2}. \quad (3)$$

Представленные на рис. 3 вспомогательные вертикальные линии наглядно иллюстрируют физический смысл параметров x_0 и D .

Используя описанную математическую модель, возможно получить картину временной эволюции кристаллизации индукционным методом. На рис. 4 приведено сравнение локализации положения фронта кристаллизации в различные моменты времени по данным ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) и индукционного датчика (ИД). Синими точками отмечены показания пяти независимых датчиков УДА, черным – кривая, полученная осреднением по данным пяти датчиков в каждый конкретный момент времени. Красная кривая отображает положение фронта кристаллизации по показаниям ИД.

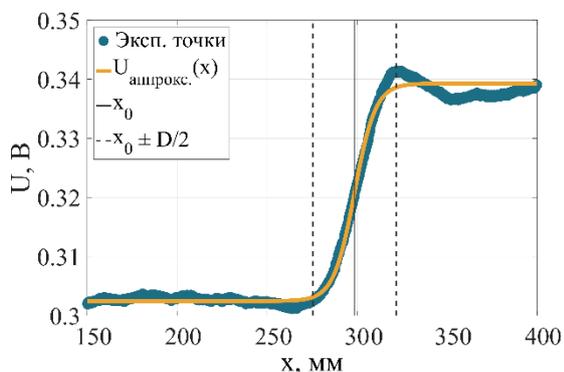


Рис. 3. Характерный профиль разности ЭДС измерительных катушек индукционного датчика и его аппроксимация аналитической кривой

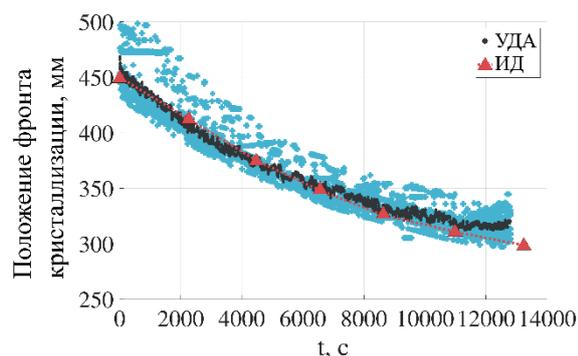


Рис. 4. Эволюция фронта кристаллизации по данным ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) и индукционного датчика (ИД)

Осреднение данных УДА было проведено для более корректного сравнения результатов измерений, поскольку индукционный датчик является ин-

тегральным в том смысле, что его эффективная область измерений сопоставима с высотой слоя металла. Тем не менее, как видно из рис. 4, сравнение двух методов показывает хорошее согласие. Относительная погрешность показаний индукционного датчика в сравнении с показаниями УДА не превышает 4%.

4. Заключение

В результате работы был разработан и апробирован индукционный датчик для измерения положения границы раздела жидкой и твердой фаз металла. В экспериментальной модели было проведено сравнение индукционного метода с хорошо разработанным ультразвуковым. Установлено, что относительная погрешность индукционного метода относительно ультразвукового не превышает 4%.

Бесконтактный характер измерений, а так же отсутствие необходимости калибровать датчик по абсолютным значениям ЭДС (важно лишь положение «ступеньки», определяемое разницей между электропроводностью жидкого и твердого металлов) позволяют использовать разработанный метод применительно к кристаллизации любых металлических расплавов.

Список литературы

1. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A., et al. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys // Metall. Mater. Trans. B. 2008. V. 39. N. 2. P. 304–316.
2. Hachani L., Zaidat K., Fautrelle Y. Experimental study of the solidification of Sn–10 wt.% Pb alloy under different forced convection in benchmark experiment // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. V. 85. P. 438–454.
3. Avnaim M. H., 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. V. 69. P. 23–32.
4. Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy // Fluid Phase Equilibria. 2018. V. 465. P. 1–9.
5. Signal Processing. Transducers Selection guide (Электронный ресурс). URL: <https://www.signal-processing.com> (Дата обращения: 01.03.2023)
6. Eltishchev V., Dimov I., Pavlinov A., et al. Inductive methods of detection the boundary of electrically conductive media in experiment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 581, 012004. DOI:10.1088/1757-899X/581/1/012004

7. Losev G., Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // *Journal of Crystal Growth*. 2019. V. 528, 125249.
8. Rowlinson J. S., Widom B. *Molecular Theory of Capillarity*. Oxford: Clarendon Press, 1982. 327 p.

References

1. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A., et al. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys. *Metall. Mater. Trans. B*, 2008, vol. 39, no. 2, pp. 304–316.
2. Hachani L., Zaidat K., Fautrelle Y. Experimental study of the solidification of Sn–10 wt.% Pb alloy under different forced convection in benchmark experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 85, pp. 438–454.
3. Avnaim M. H., 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.
4. 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.
5. *Signal Processing. Transducers Selection guide*. (Electronic resource) URL: <https://www.signal-processing.com> (Date of access: 01 March 2023)
6. Eltishchev V., Dimov I., Pavlinov A., et al. Inductive methods of detection the boundary of electrically conductive media in experiment. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 581, 012004. DOI:10.1088/1757-899X/581/1/012004
7. Losev G., Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field. *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 528, 125249.
8. Rowlinson J. S., Widom B. *Molecular Theory of Capillarity*. Oxford: Clarendon Press, 1982. 327 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лосев Г. Л., Ельтищев В. А. Индукционный метод локализации фронта кристаллизации // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 1. С. 57–61. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-57-61

Please cite this article in English as:

Losev G. L., Eltishchev V. A. Induction method of the solidification front localization. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 1, pp. 57–61. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-57-61

Сведения об авторах

1. Лосев Геннадий Леонидович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.
2. Ельтищев Владислав Андреевич, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.

Author information

1. Gennadii L. Losev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. Vladislav A. Eltishchev, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia