

УДК 537.84, 536.421.4

DOI: 10.15372/PMTF202415563

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗ ТОКОВ ПИТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ

Г. Л. Лосев, А. Д. Мамыкин

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mails: losev.g@icmm.ru, mad@icmm.ru

Экспериментально изучен процесс кристаллизации галлиевого сплава в прямоугольной плоской кювете, расположенной вертикально, при внешнем электромагнитном воздействии. Показана возможность эффективного управления скоростью движения и формой фронта кристаллизации посредством изменения параметров питания электромагнитного перемешивателя. Путем перебора амплитуды электромагнитных сил выбран режим, характеризующийся интенсивным перемешивающим течением и существенной неоднородностью фронта кристаллизации. Для данного режима показано, что изменение фазных углов токов питания линейной индукционной машины позволяет принципиально изменять топологию гидродинамических потоков расплава при постоянной величине питания перемешивателя. Это, в свою очередь, приводит к изменению характеристик теплообмена и, следовательно, условий в области межфазной границы, что позволяет опосредованно управлять однородностью фронта кристаллизации и, в меньшей степени, скоростью фазового перехода. Исследованы вклад конвекции в формирование течения и ее влияние на процесс кристаллизации. В частности, показано, что тепловая конвекция может привести к образованию дополнительных вихревых структур вблизи теплообменников, что препятствует кристаллизации металла.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, гидродинамика, бегущее магнитное поле, кристаллизация, линейная индукционная машина

Введение. В настоящее время в металлургической и атомной промышленности активно используются электромагнитные аппараты — технологические устройства, создающие движение электропроводной среды бесконтактным способом за счет действия электромагнитной силы (электромагнитные насосы, дроссели, расходомеры и перемешиватели) [1, 2]. Перемешиватели применяются для улучшения качества металлов и их сплавов при литье в промышленных условиях, а именно для достижения большей степени гомогенизации при добавлении легирующих добавок, для повышения однородности мелкозернистой кристаллической структуры, для уплотнения фронта кристаллизации, а также для улучшения структуры металла вблизи стенок кристаллизатора [3–6]. Одной из областей промышленного производства металлов является изготовление слитков с прямоугольным сечением. Наиболее полное перемешивание расплавов в изложницах с соответству-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и администрации Пермского края (код проекта 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106>).

© Лосев Г. Л., Мамыкин А. Д., 2024

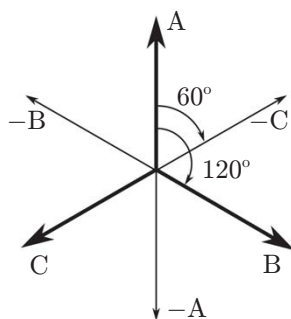


Рис. 1. Углы между фазами токов стандартной трехфазной сети

ющим форм-фактором достигается при использовании линейных индукционных машин (ЛИМ) [7].

Переменное магнитное поле порождает в проводящей среде вихревые токи, при взаимодействии которых с исходным магнитным полем возникает объемная электромагнитная сила. Если среда является жидкой, электромагнитная сила порождает вихревые течения [8]. Распространенным вариантом переменного электромагнитного поля является так называемое бегущее магнитное поле (БМП), периодическое изменение которого происходит не только во времени, но и вдоль некоторой пространственной оси. На практике это достигается за счет распределенного в пространстве индуктора.

Периодическое изменение амплитуды БМП вдоль выбранного направления эквивалентно механическому перемещению локализованного источника переменного магнитного поля. При этом БМП порождает среднюю во времени силу. Величина толкающей силы, создаваемой БМП, может быть вычислена аналитически. Согласно работам [9, 10] выражение для планарной компоненты толкающей силы может быть представлено в виде

$$\langle F_x \rangle = \frac{\sigma \omega B_0^2 \tau}{2\pi},$$

где B_0 — амплитуда вектора плотности магнитной индукции, направленного перпендикулярно плоскости индуктора; ω — круговая частота тока в катушках индуктора; τ — величина шага между зубцами индуктора.

Промышленная реализация БМП сводится к построению индуктора с $6N$ ($N \in \mathbb{N}$) последовательно размещенными катушками, запитываемыми от трехфазной сети. В стандартной трехфазной сети питания угол между любыми двумя фазами составляет 120° . Для создания БМП шесть последовательно расположенных катушек подключаются к фазам питания (рис. 1) в порядке, определяемом движением по часовой стрелке вдоль звезды токов. Таким образом, при переходе от катушки к катушке происходит изменение фазы питающего тока (а следовательно, и магнитного поля) на угол, равный 60° . Масштабирование данной системы осуществляется за счет последовательного добавления N секций, состоящих из аналогичным образом подключенных шести катушек индуктивности.

При неоднородной по объему температуре жидкости в среде может возникать свободная тепловая конвекция. Необходимым условием возникновения конвективных течений является наличие ненулевого угла между градиентом температуры в жидкости и направлением силы тяжести [11]. Скорость существующего течения зависит от величины перепада температуры, линейных размеров жидкого объема и физических свойств самой жидкости и в обобщенном безразмерном виде характеризуется числом Грасгофа:

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

Здесь g — ускорение свободного падения; β — коэффициент теплового расширения; L — характерный линейный размер; ν — вязкость; $T_h - T_c$ — разность температур нагревателя и охладителя.

Традиционно рассматриваемые в лабораторных условиях конвективные течения считаются сравнительно слабоинтенсивными в силу малых линейных размеров исследуемых полостей и ограниченных градиентов температуры. Тем не менее при размере полости, близком к промышленным масштабам, даже малые (доли градуса) перепады температуры порождают течения достаточной для детектирования интенсивности. В задачах, связанных с фазовыми переходами металлов (плавка и кристаллизация), перепады температуры могут достигать сотен градусов, что наряду с большими объемами промышленных установок делает конвективный механизм течений одним из важнейших факторов перемешивания расплава.

Важность учета свободной тепловой конвекции подтверждают методы выращивания полупроводниковых кристаллов. Для того чтобы максимально уменьшить интенсивность конвективных течений, угол между градиентом температуры и направлением силы тяжести минимизируется путем локализации подогрева. Однако такая точность труднодостижима в металлургическом производстве, поэтому необходимо разработать иные способы подавления или изменения течений в расплавах.

В соответствии с терминологией работы [12] по аналогии с числом Грасгофа введем безразмерный силовой критерий F , определяемый соотношением

$$F = \frac{\langle F_x \rangle L^3}{\rho \nu^2}$$

и представляющий собой отношение толкающей (возбуждающей течение) электромагнитной силы к силам вязкой диссипации.

Безразмерный критерий $N = Gr/F$ характеризует отношение сил, вызывающих тепловую конвекцию, к силам электромагнитного перемешивания.

При стандартном БМП управление потоком происходит за счет изменения амплитуды и частоты тока в катушках индуктора. Это приводит к изменению интенсивности возникающего течения, но не вызывает существенного изменения его топологии. В работе [13] показано, что изменение углов между фазами токов приводит к изменению не только интенсивности, но и топологии возникающих течений, что открывает новые возможности для осуществления электромагнитного воздействия на жидкие проводящие среды.

Таким образом, целью настоящей работы является определение макроскопических параметров кристаллизации, таких как скорость и величина неоднородности фронта, для предлагаемого способа управления перемешиванием жидкого металла.

1. Экспериментальная установка. Экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой плоский вертикальный слой жидкого металла, размещенный над индуктором ЛИМ. Жидкий металл заключен в кювету из стеклотекстолита. На торцах слоя размещаются медные теплообменники, подключенные через систему вентиля к криотермостатам. Кювета оборудована фальшстенкой, в которой размещен набор малоинерционных термодпар. Измерения скорости течения жидкого металла проводятся с помощью пяти датчиков TR0408LS ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 2000 (Signal Processing, Switzerland). Датчики располагаются в пазах медной стенки таким образом, что ультразвуковые лучи направлены вдоль слоя по оси X . Снаружи кювета теплоизолирована слоем стекловаты.

В качестве рабочей жидкости используется сплав $Ga_{86,3}Zn_{10,8}Sn_{2,9}$ (массовая доля, %) с температурой плавления $17^\circ C$. Физические характеристики сплава при комнатной температуре имеют следующие значения: плотность — 6256 кг/м^3 , коэффициент объемного

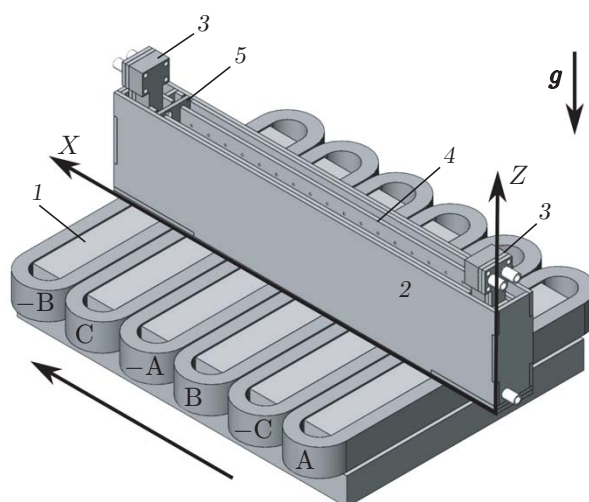


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — ЛИМ, 2 — стеклотекстолитовая ячейка, 3 — теплообменники, 4 — фальшстенка, 5 — медная стенка; стрелка — направление БМП; А, В, С — фазы тока питания

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. Дополнительная информация о физических свойствах используемого сплава приведена в работе [14]. Внутренние размеры рабочей полости составляют $420 \times 20 \times 100$ мм, планарные размеры ЛИМ 480×350 мм. Магнитное поле генерируется шестью катушками по 170 витков в каждой. Питание катушек осуществлялось от трехфазного программируемого источника Pacific Smart Source 360 ASX-UPC3 3, позволяющего задавать произвольную форму выходного сигнала, контролировать амплитуду и частоту гармонического тока, а также задавать углы между фазами токов. Использовался гармонический ток с несущей частотой 50 Гц.

Медная пластина служит для обеспечения однородности граничных условий и закрепления в ней датчиков УДА. Звукоизлучающие поверхности датчиков УДА находятся в одной плоскости с пластиной, создавая сплошную твердую границу. При этом медь улучшает теплопередачу от горячего теплообменника к рабочему слою жидкого металла в области, где расположены датчики. Таким образом, датчики УДА всегда находятся в жидкой фракции металла без риска повреждения при изменении объема кристаллизующегося металла.

Теплообменники создают в слое жидкого металла горизонтальный градиент температуры, параллельный направлению действия БМП. Торцевые поверхности теплообменников, контактирующие с жидким металлом, залужены галлием, что обеспечивает тепловой контакт между ними. Температура горячего теплообменника составляет 18 °С, температура холодного — −30 °С. Таким образом, в слое создается градиент температуры $\nabla T_0 = 8,9 \cdot 10^{-3}$ К/м.

Каждый из теплообменников подключен к отдельному термостату через систему вентиля, что обеспечивает возможность задания одинаковых начальных условий. Система вентиля включает байпасную ветвь, по которой движется жидкий теплоноситель до выхода термостата на рабочий температурный режим, расходомер для оценки снимаемой теплообменником тепловой мощности и набор термопар для контроля температуры теплоносителя в баке термостата и в контуре системы вентиля. Также дополнительные термопары располагаются на поверхности медных теплообменников без контакта с галлиевым сплавом. После установления заданной температуры теплоносителя в термостатах

перекрывались краны байпасной ветви и трехходовые вентили переключались в режим транзитного течения. Одновременно включались датчики скорости и температуры.

2. Методика эксперимента. В данной работе основными средствами измерения являются доплеровские датчики скорости. Принцип работы УДА основан на анализе изменения частот ультразвуковых волн между ультразвуковыми импульсами, излучаемыми и отраженными от частиц в движущейся среде [15]. Наличие звукоотражающих частиц является необходимым условием использования этого метода. В частности, при использовании сплава GaZnSn диспергированной фазой служат частицы оксидов Ga_2O и Ga_2O_3 . Пространственное положение точки, в которой измеряется скорость потока, определяется временем прохождения ультразвукового импульса (временем, за которое излучаемый импульс возвращается в приемник). Преобразователь УДА излучает высокочастотные волновые пакеты, которые отражаются от микрочастиц, содержащихся в среде. Частицы, увлекаемые потоком жидкости, позволяют получить информацию о локальной скорости в точках их расположения.

Важной проблемой ультразвуковых измерений является прохождение ультразвуком межфазных границ. Значительный скачок акустического сопротивления, представляющего собой произведение скорости звука и плотности среды, приводит к множественным отражениям звуковых волн, что затрудняет измерение скорости. Однако явления, возникающие на границах раздела фаз, позволяют использовать ультразвуковую анемометрию для изучения многофазных сред. Этот метод может применяться для определения положения как твердых частиц [16], так и газовых пузырей [17]. Более того, анализ сигнала эха позволяет также определять положение межфазной границы при кристаллизации металла [18, 19], что технически сложно выполнить, используя другие методы. Во всех описанных случаях граница раздела сред определяется по узкому локальному максимуму в пространственном профиле эха. Наличие данного максимума обусловлено изменением скорости звука и отражением волн на границе раздела. Этот метод применим также для определения уровня жидкости (в том числе жидкого металла) как в стационарном (неподвижная граница), так и в динамическом (колебания поверхности металла) случае.

Поскольку метод ультразвуковых измерений является неинвазивным, при его использовании отсутствуют возмущения или загрязнения на поверхности жидкой среды. Основным ограничением метода является диапазон рабочих температур. При изучении течений сильнонагретых сред (расплавы металлов, полупроводников и др.) следует не допускать перегрева пьезоэлемента ультразвукового датчика во избежание фазового перехода излучателя при температурах выше точки Кюри. Тем не менее ультразвуковой метод применим при проведении лабораторных исследований с использованием относительно легкоплавких (температура плавления менее $200^\circ C$) металлов [20]. Поскольку анализ положения границ раздела фаз и скорости течения среды проводится на основе одних и тех же данных об излученных и принятых ультразвуковых импульсах, ультразвуковой метод позволяет получать дополнительную информацию о движении среды, что весьма важно при изучении комплексных процессов, таких как магнитогидродинамическое управление кристаллизацией.

Термопары используются для получения дополнительной информации о скорости фазового перехода и форме теплового фронта. В фальшстенку кюветы вмонтированы 19 хромель-алюмелевых термопар вдоль двух координатных осей (рис. 3): 12 термопар располагаются вдоль оси X с шагом 25 мм, 7 термопар располагаются вдоль оси Z с шагом 10 мм. Размер термоспая составляет 1 мм, термопары выполнены из экранированной витой пары.

Поскольку ЛИМ создает электромагнитные шумы, препятствующие корректной работе термопарных датчиков, для проведения измерений температуры была применена спе-

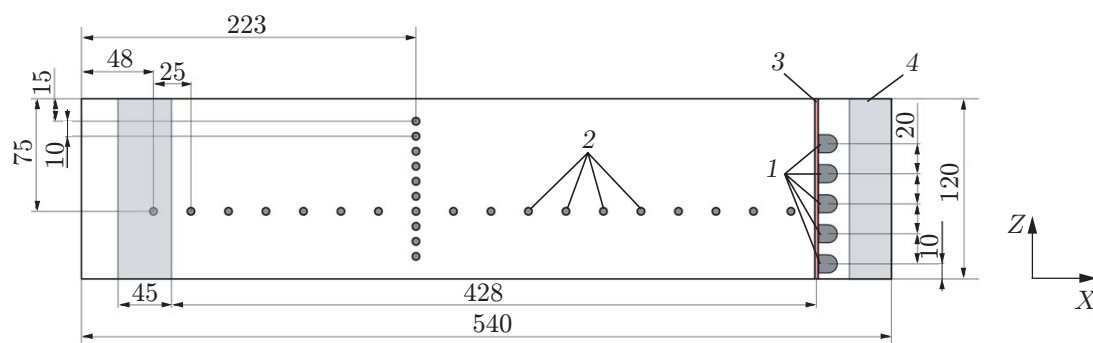


Рис. 3. Схема расположения ультразвуковых и термопарных датчиков в слое:
1 — датчик УДА, 2 — термопара, 3 — стенка охладителя, 4 — теплообменник

циальная схема питания. Питание ЛИМ осуществляется с использованием набора семи-сторных ключей, управляемых генератором Tektronix AFG3252C. С периодичностью 30 с происходит отключение питания на малый (0,06 с) промежуток времени. За это время измеряется температура на обеих линейках термопар. Мощность питания ЛИМ регистрируется непрерывно. Для измерения фазных токов используются трансформаторы тока и платы National Instruments NI9227, измерение фазных напряжений осуществляется с помощью плат NI9225, для регистрации температуры используются платы NI9213.

В работе [21] показано, что результаты термопарных и ультразвуковых измерений хорошо согласуются при оценке средней скорости кристаллизации, однако термопарный метод дает существенные ошибки при восстановлении формы фронта кристаллизации. Поэтому в рамках данной работы исследуется, главным образом, ультразвуковой метод измерения при учете влияния гидродинамических процессов на фазовый переход.

3. Обработка сигналов. Как отмечалось выше, ультразвуковая доплеровская анемометрия может использоваться для определения положения границ жидкой фазы. Определение границы раздела фаз таким методом основано на алгоритме поиска локальных экстремумов. Характерным признаком наличия межфазной границы является присутствие выраженных пиков на профилях эха. Наличие локальных экстремумов обусловлено переполнением переменных измерительного прибора за счет экстремального уровня звука в областях множественного переотражения и наложения звуковых волн. Несмотря на то что в этих областях невозможно измерить скорость течения среды, локальные экстремумы на профиле эха важны для локализации границ раздела. Положение соответствующих локальных экстремумов рассчитывалось в среде Matlab по двухэтапному алгоритму. На первом этапе проводилась перенормировка сигнала к некоторому значению, при котором существует множество различных локальных максимумов. Для перенормированного сигнала применяется функция поиска локальных экстремумов, амплитуда которых составляет не менее 75 % максимума сигнала. Алгоритм обработки данных был проверен на тестовых сигналах, моделирующих пики различной ширины и амплитуды на профиле эха, и протестирован при определении высоты столба жидкого металла с плоской свободной поверхностью. Точность локализации локальных экстремумов модельных сигналов укладывается в удвоенный шаг по пространственной координате $2dz = 0,718$ мм. Такая величина шага dz выбрана с учетом пространственного разрешения датчиков. Частота сбора данных составляла 1,4 Гц при длительности одного эксперимента порядка 4 ч. Положение фронта кристаллизации определялось по 100 временным точкам, за это время граница раздела фаз смещалась несущественно. Отклонение от среднего значения, обусловленное неточностью определения положения фронта кристаллизации вследствие неровности гра-

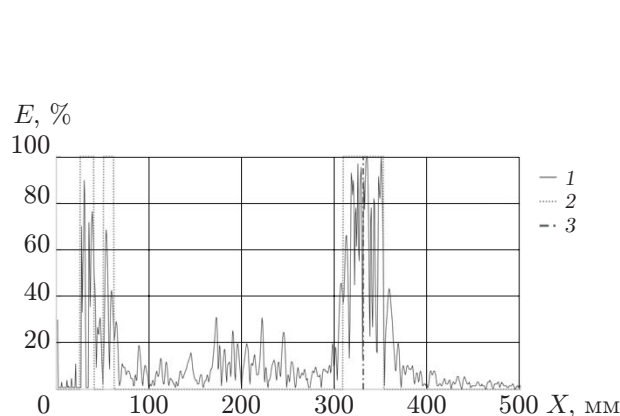


Рис. 4

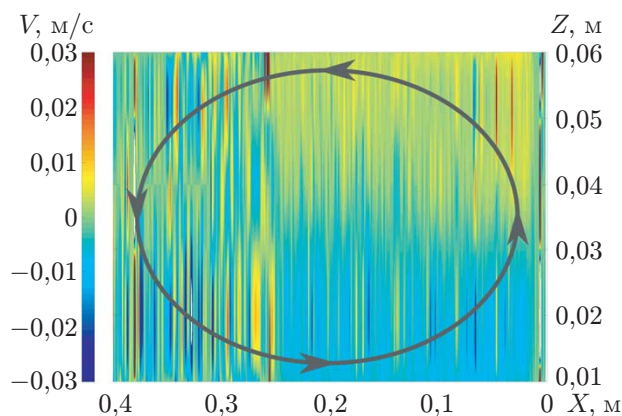


Рис. 5

Рис. 4. Локализация межфазной границы по измеренному профилю эха E : сплошная линия — профиль эха, пунктирная — аппроксимация локальных максимумов, определяемых с помощью алгоритма обработки сигнала, штрихпунктирная — положение границы раздела фаз

Рис. 5. Поле продольной компоненты скорости при свободноконвективном течении (стрелки — направление движения жидкости в слое)

ницы, не превышало 4 мм. Разработанный алгоритм определения положения межфазной границы был применен для определения положения и формы фронта кристаллизации. На рис. 4 показан реальный профиль эха, а также положение границы раздела фаз в фиксированный момент времени.

4. Результаты исследования. Прежде чем исследовать процесс кристаллизации во внешних силовых полях в целом, следует определить основные характеристики влияния свободной тепловой конвекции и принудительного электромагнитного перемешивания.

4.1. Тепловая конвекция. В процессе кристаллизации в отсутствие внешнего перемешивания под действием перепада температуры в жидкости возникает свободноконвективное течение. В слое генерируется крупномасштабный вихрь. Экспериментально полученное поле X -компоненты скорости представлено на рис. 5. Продольный градиент температуры составляет 112 К/м, максимальная скорость потока достигает 0,01 м/с, что соответствует значению числа Рейнольдса $Re = 4,2 \cdot 10^4$.

Следует отметить, что датчики УДА имеют нижний предел измерения скорости. УДА DOP 2000 имеет нижний предел измерения, равный нескольким миллиметрам в секунду. При измерении малых скоростей внешние акустические шумы могут вносить существенные искажения в получаемые профили скорости, поскольку прибор усиливает и интерпретирует шумы, по порядку величины сопоставимые с полезным сигналом. На представленном на рис. 5 поле скорости локализованные экстремальные значения скорости (четко выраженные полосы на фоне медленно меняющегося среднего профиля) являются следствием шумов. При более интенсивных течениях сдвиг фаз вследствие эффекта Доплера оказывается достаточным для разделения полезного сигнала и паразитных явлений. Погрешность измерений УДА скоростей, превышающих 1 см/с, составляет 2 мм/с.

В данной постановке число Грасгофа равно $Gr = 4 \cdot 10^{10}$. Для определения безразмерных критериев в качестве характерного размера используется продольный масштаб слоя $L = 0,430$ м.

В качестве основных характеристик процесса кристаллизации введем среднюю скорость U_{avr} и величину неоднородности скорости движения фронта кристаллизации U_{RMS} ,

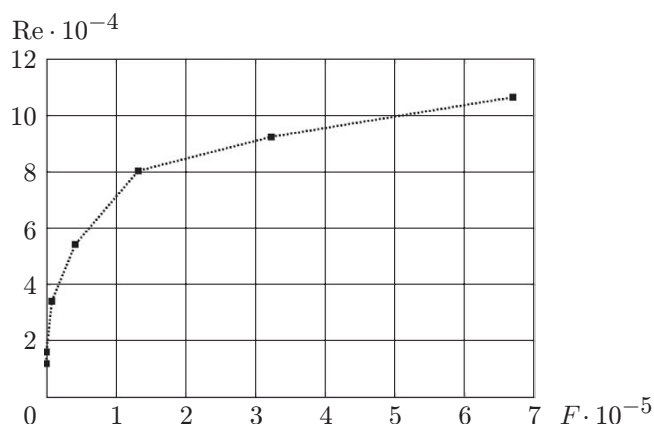


Рис. 6. Зависимость среднего числа Рейнольдса для изотермического потока от силового параметра электромагнитного воздействия

определяемую как среднеквадратичный разброс скоростей кристаллизации по высоте слоя. Исследуем возможность управления введенными характеристиками процесса посредством изменения параметров питания электромагнитного перемешивателя.

Ультразвуковые измерения показывают, что средняя скорость кристаллизации в отсутствие принудительного перемешивания составляет $2 \cdot 10^{-2}$ м/с. Величина неоднородности скорости движения фронта кристаллизации составляет $7,3 \cdot 10^{-3}$ м/с и по мере продвижения фронта уменьшается до значений порядка 10^{-4} м/с.

4.2. Изотермическое течение. На втором этапе рассмотрим процесс электромагнитного перемешивания в отсутствие перепада температуры. Под действием БМП в слое возникает крупномасштабное одновихревое течение, охватывающее весь слой [12, 21]. На рис. 6 приведена зависимость числа Рейнольдса (определенного через среднюю по времени и объему скорость потока) от безразмерной силы F . Видно, что с увеличением величины питания индуктора скорость течения нелинейно возрастает. Точки на рис. 6 соответствуют значениям силы тока питания обмоток индуктора, равным $0 \div 6$ А. При увеличении амплитуды внешнего силового воздействия течение сохраняет крупномасштабную пространственную структуру, увеличивается лишь скорость вращения вихрей. При достижении достаточно больших чисел Рейнольдса течение турбулизуется, сохраняя крупномасштабную структуру вихрей [22]. Заметим, что изменение силового параметра происходило за счет изменения силы питающего ЛИМ тока при фиксированной частоте 50 Гц.

Изменение углов между фазными токами питания индуктора позволяет изменять пространственно-временную конфигурацию магнитного поля и, соответственно, гидродинамическую структуру возникающих потоков. На рис. 7 приведены профили продольной компоненты скорости течения в слое жидкого металла при различных режимах питания ЛИМ. За счет изменения углов φ_B и φ_C между токами фаз А и В, А и С соответственно удастся изменять не только интенсивность и направление крупномасштабного течения, но и количество возникающих вихрей.

Использование пульсирующего магнитного поля ($\varphi_{B,C} = 0; 180^\circ$) не приводит к возникновению крупномасштабных вихрей. Проявляются лишь малоинтенсивные сдвиговые течения (см. рис. 7,а).

При углах $\varphi_C \leq 30^\circ$ для всех φ_B , кроме $\varphi_B = 0; 180^\circ$, реализуется крупномасштабное четырехвихревое течение (см. рис. 7,б). Пространственные размеры вихрей одинаковы, а интенсивность зависит от конкретного угла φ_B .

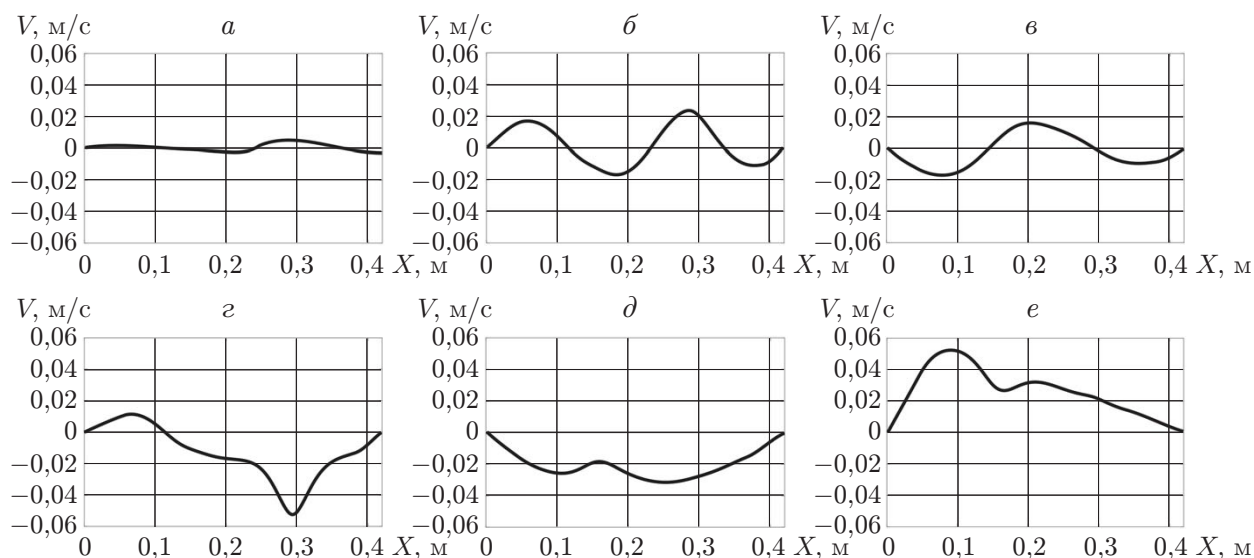


Рис. 7. Профили скорости при различных режимах питания ЛИМ:

a — слабоинтенсивное многовихревое течение, *б* — четырехвихревое течение, *в* — трехвихревое течение, *г* — двухвихревое течение, *д* — реверсивный крупномасштабный вихрь, *е* — крупномасштабный вихрь

Аналогично при углах $\varphi_B \leq 30^\circ$ для всех углов φ_C , кроме $\varphi_C = 0; 180^\circ$, реализуется трехвихревое течение (см. рис. 7, *в*). Размеры вихрей также одинаковы, а общая интенсивность течения изменяется при вариациях угла φ_C .

В ограниченной области углов вблизи диагонали $\varphi_B = \varphi_C$ реализуется двухвихревое течение (см. рис. 7, *г*), характеризующееся неоднородностью по пространственной координате. Один из вихрей отличается как по размерам, так и по интенсивности. При этом вихревая структура остается устойчивой, т. е. размеры вихрей практически не меняются со временем.

В большинстве режимов питания ЛИМ реализуется крупномасштабное вихревое течение (см. рис. 7, *д, е*). В зависимости от выбранных фаз токов возможно изменение направления закрутки вихря. Если течение, совпадающее по направлению закрутки с течением, реализующимся в режиме БМП ($\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 240^\circ$), считать прямым, то режимы течений можно разделить следующим образом. Выше диагонали $\varphi_B = \varphi_C$ реализуется обратное течение при $\varphi_B < \varphi_C$, соответственно, ниже диагонали реализуется прямое течение при $\varphi_B > \varphi_C$.

На рис. 8 приведено поле средних чисел Рейнольдса потока в зависимости от углов фазных токов. Видно, что наименьшей интенсивностью обладают течения, возникающие в режимах пульсирующего магнитного поля $\varphi_{B,C} = 0^\circ$ и $\varphi_B = \varphi_C$. Крупномасштабные одновихревые течения имеют близкие скорости в обоих направлениях вращения вихря, однако в режимах $\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 210^\circ$ наблюдаются специфичные одновихревые течения пониженной интенсивности. При увеличении амплитуды внешнего воздействия в рассмотренном диапазоне значений F при фиксированных значениях фазных углов токов пространственная структура вихрей сохраняется.

4.3. Управление кристаллизацией. Воздействие внешнего электромагнитного поля при наличии градиента температуры позволяет реализовать различные режимы тепломассообмена и, следовательно, управлять процессом кристаллизации металла.

Изменение электромагнитного воздействия позволяет повышать интенсивность как крупномасштабного течения, так и мелкомасштабных пульсаций, что, в свою очередь,

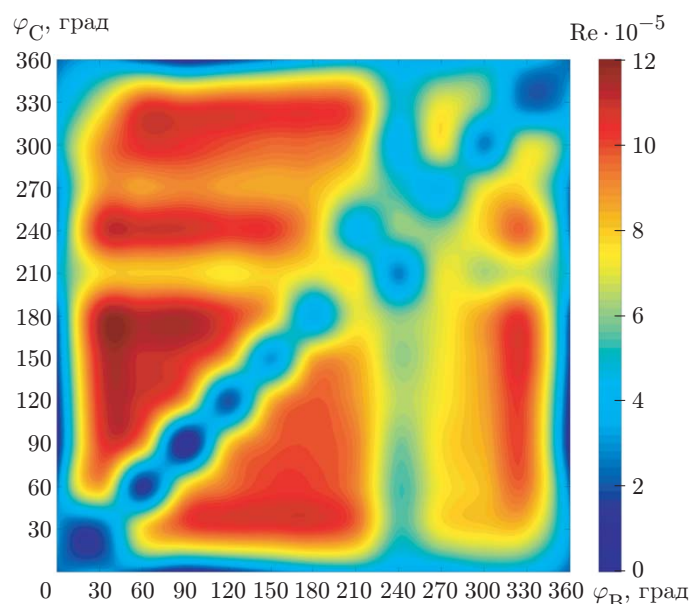


Рис. 8. Среднее число Рейнольдса при различных значениях фазных углов токов питания ЛИМ

обеспечивает возможность увеличения интенсивности перемешивания жидкой фазы и повышает эффективность теплообмена в процессе кристаллизации. На рис. 9 показаны поля продольной компоненты скорости течения жидкого металла, а также положение и форма фронта кристаллизации в различные моменты времени после начала процесса фазового перехода в зависимости от величины силового параметра F .

Введем параметр аспектного отношения $\Gamma = L_s/L$, где L_s — средний размер области, заполненной кристаллической фазой, вдоль оси X ; L — постоянное во времени расстояние между медными теплообменниками. Тогда в начале процесса $\Gamma = 0$, а значение $\Gamma = 1$ соответствует полному застыванию металла. Согласно данным численного моделирования [12] величина интегральной толкающей силы, действующей на объем жидкой фазы, квадратично зависит от параметра Γ , а именно незначительно возрастает при малых Γ , имеет максимум в области $\Gamma \approx 0,3$ и резко уменьшается при $\Gamma > 0,5$.

На рис. 9 видно, что при небольшом значении параметра $F = 8,2 \cdot 10^3$ в момент времени $t = 180$ мин кристаллическая фаза занимает большую часть области ($\Gamma \approx 0,75$), а интенсивность течения уменьшается. При больших значениях силового параметра F скорость кристаллизации уменьшается, и к моменту времени $t = 180$ мин параметр аспектного отношения составляет $\Gamma \approx 0,5$. Соответственно, толкающая сила, а значит, и интенсивность течения изменяются незначительно. При этом с ростом F интенсивность течения возрастает.

При воздействии внешнего электромагнитного поля влияние тепловой конвекции на процесс кристаллизации является незначительным, так как соотношение скоростей течений, возникающих при конвекции и при электромагнитном перемешивании, не превышает 0,1. Более того, конвективный вихрь сонаправлен с потоком, вызванным воздействием электромагнитной силы и, следовательно, является усиливающим вынужденное течение фактором. Несмотря на увеличение градиента температуры, обусловленное изменением аспектного отношения для области, заполненной жидкой фазой, величина критерия действия архимедовой силы $G\Gamma$ уменьшается, поскольку линейный размер области входит в определение параметра в третьей степени. Визуальная оценка скорости движения фрон-

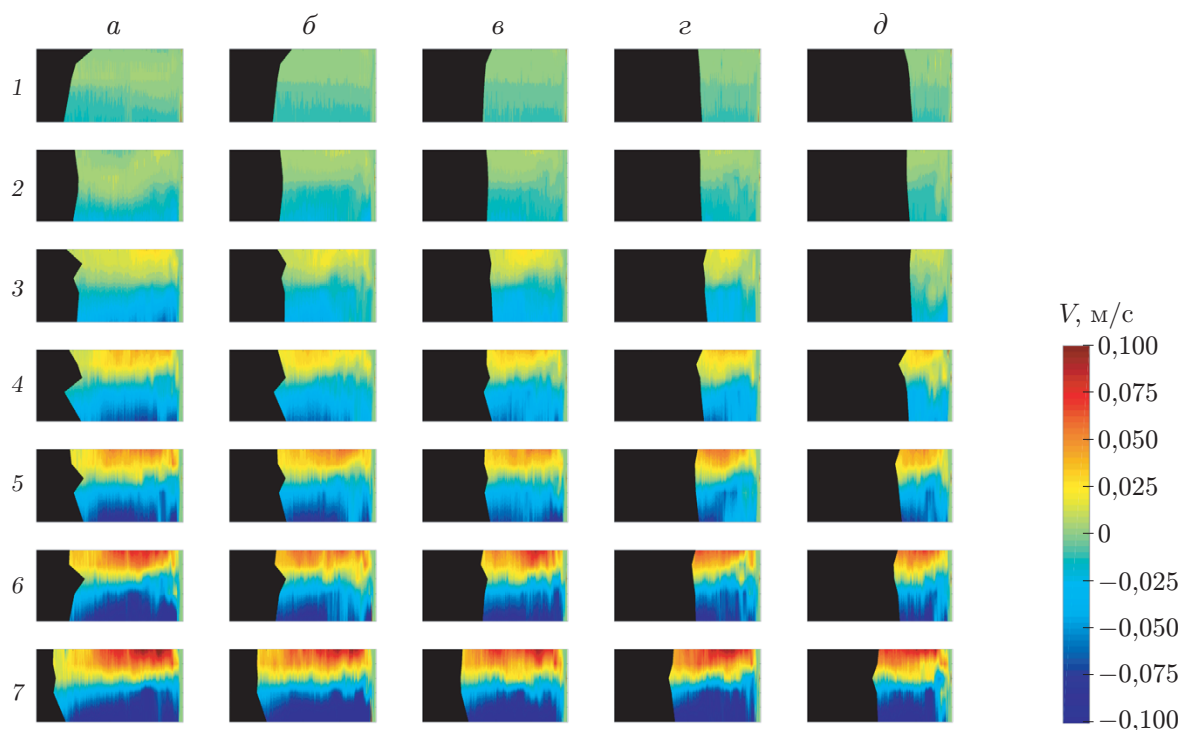


Рис. 9. Распределение продольной компоненты скорости потока в слое (цветные области) и форма кристаллической фазы (черные области) в различные моменты времени при различных значениях силового параметра F :

a — $t = 5$ мин, $б$ — $t = 30$ мин, $в$ — $t = 60$ мин, $г$ — $t = 120$ мин, $д$ — $t = 180$ мин;
 1 — $F = 0$, 2 — $F = 5,0 \cdot 10^2$, 3 — $F = 8,2 \cdot 10^3$, 4 — $F = 4,2 \cdot 10^4$, 5 — $F = 1,3 \cdot 10^5$,
 6 — $F = 3,2 \cdot 10^5$, 7 — $F = 6,7 \cdot 10^5$

та кристаллизации показывает нетривиальную зависимость от F . На рис. 10 представлены диаграммы средней скорости движения фронта кристаллизации U_{avr} и среднеквадратичного разброса скоростей U_{RMS} фронта кристаллизации в зависимости от силового параметра F , определяемые как среднее и, соответственно, среднеквадратичное значения, полученные пятью датчиками УДА, расположенными по высоте слоя.

Скорость кристаллизации уменьшается со временем во всех рассмотренных режимах. Наибольшая скорость кристаллизации наблюдается при $F = 8,2 \cdot 10^3$, наименьшая — при $F = 6,7 \cdot 10^5$. Таким образом, интенсивное перемешивание приводит к уменьшению скорости кристаллизации, но обеспечивает равномерность движения фронта (см. рис. 10, $б$). Наименьшее значение величины неравномерности движения фронта кристаллизации по высоте слоя наблюдалось при минимальном рассмотренном значении F , что также обеспечивало значение скорости кристаллизации, сопоставимое с соответствующим значением в отсутствие внешнего воздействия. При этом в отсутствие внешнего перемешивания неравномерность движения фронта кристаллизации является максимальной. Анализ результатов, приведенных на рис. 10, позволяет сделать вывод, что оптимальным режимом (быстрое продвижение равномерного фронта кристаллизации) силового воздействия является минимальное перемешивание.

Наибольший интерес представляет исследование возможности управления процессом кристаллизации при $F = 4,2 \cdot 10^4$ за счет изменения фазных углов токов питания перемешивателя. Рассмотрим режимы течений и соответствующие изменения процесса кристаллизации в сравнении с режимом БМП ($\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 240^\circ$). На рис. 11 приведены поля

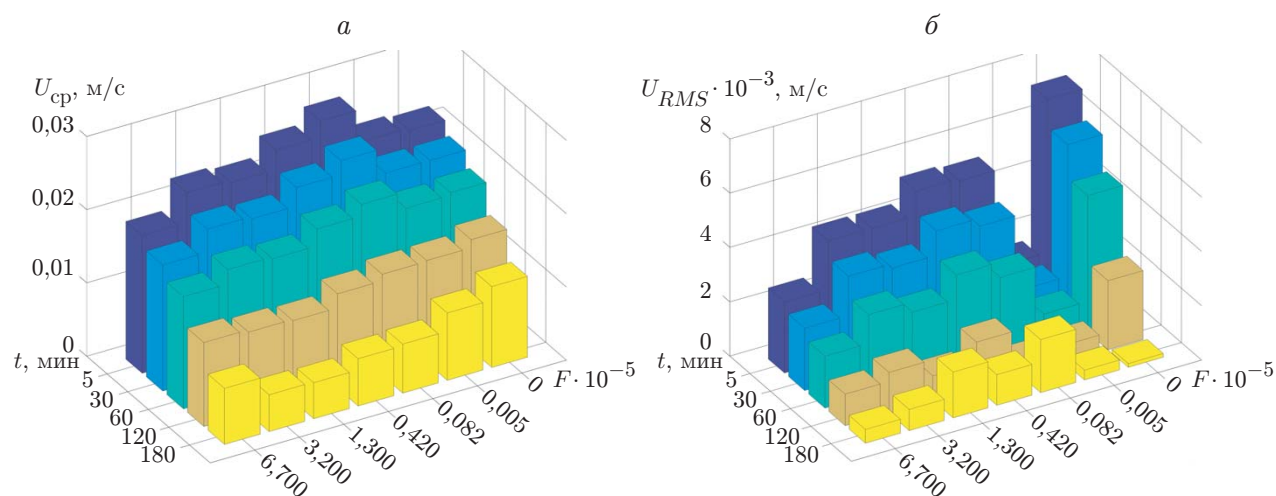


Рис. 10. Зависимости средней скорости движения фронта кристаллизации (а) и среднеквадратичного разброса скорости фронта кристаллизации по высоте слоя (б) от величины питания ЛИМ в различные моменты времени

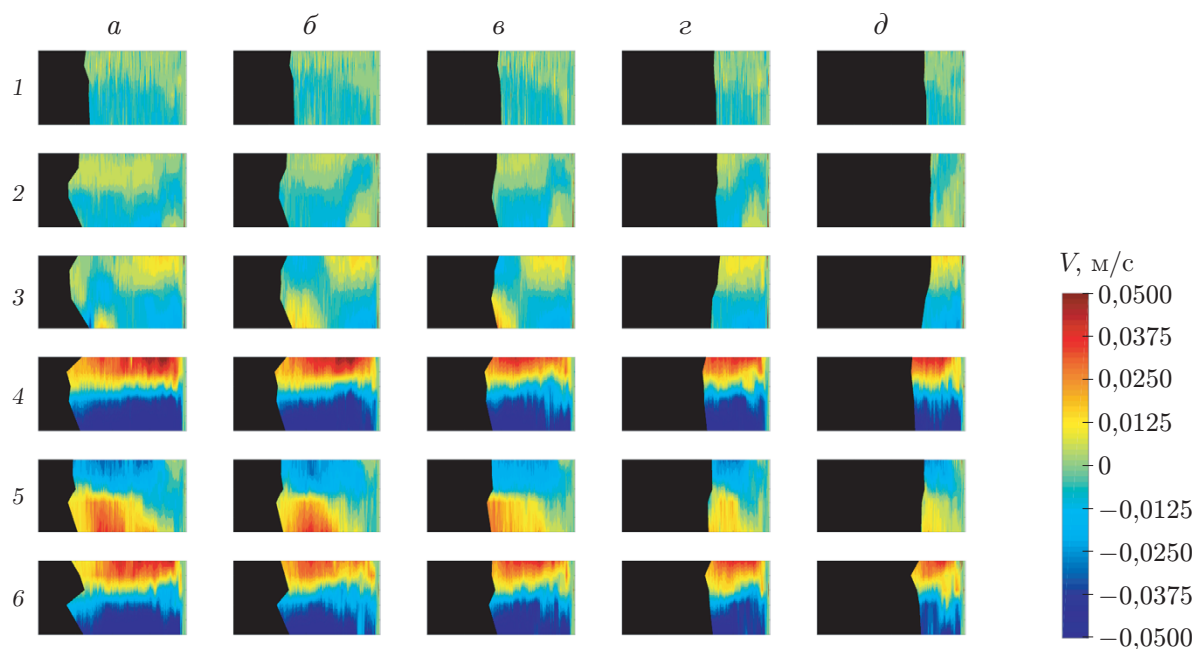


Рис. 11. Распределение продольной компоненты скорости потока в слое (цветные области) и форма кристаллической фазы (черные области) в различные моменты времени при различных значениях фазных углов токов ЛИМ:

a — $t = 5$ мин, $б$ — $t = 30$ мин, $в$ — $t = 60$ мин, $г$ — $t = 120$ мин, $д$ — $t = 180$ мин; 1 — $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$, 2 — $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 210^\circ$, 3 — $\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$, 4 — $\varphi_B = 270^\circ$, $\varphi_C = 300^\circ$, 5 — $\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 90^\circ$, 6 — $\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 240^\circ$

продольной компоненты скорости течения жидкого металла, а также положение и форма фронта кристаллизации в различные моменты времени после начала процесса фазового перехода в зависимости от фазных углов токов. Изменение фазных углов может привести к изменению направления вращения крупномасштабного вихря ($\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 90^\circ$). Данный режим характеризуется незначительным уменьшением интенсивности течения за счет конкуренции вынужденного течения и процесса конвективного теплообмена: вблизи горячего теплообменника создается небольшой дополнительный вихрь, перераспределяющий поле температуры в этой области. Это приводит к сглаживанию фронта кристаллизации на больших временах ($t > 120$ мин), когда зона межфазного перехода достигает указанной области.

Согласно рис. 7 режим $\varphi_B = 270^\circ$, $\varphi_C = 300^\circ$ в отсутствие градиента температуры характеризуется существованием четырех вихрей. При наличии градиента температуры поле скорости вырождается в одиночный крупномасштабный вихрь с выраженными пульсациями в области встречных потоков жидкости в середине слоя. Характерный масштаб данных возмущений соответствует масштабу вихрей при изотермическом течении.

Режим $\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$ характеризуется трансформацией течения в процессе кристаллизации: в начале процесса реализуется трехвихревое течение, по мере продвижения фронта кристаллизации и уменьшения аспектного отношения для области, заполненной жидкой фазой, течение становится двухвихревым, а затем преобразуется в одиночный крупномасштабный вихрь. При сохранении постоянной величины питания индуктора БМП интенсивность течения в данном режиме существенно меньше, чем при воздействии стандартного БМП. Изменение топологии течения со временем приводит к изменению формы фронта кристаллизации (задержка фазового перехода в придонной области).

В режиме $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 210^\circ$ реализуется слабое двухвихревое течение, топология которого сохраняется в течение всего процесса кристаллизации. Меньший вихрь вблизи горячего теплообменника подавляет конвективный поток и сохраняет свой размер вплоть до момента, в который фронт кристаллизации достигает области расположения вихря. Следует отметить высокую однородность фронта на больших временах ($t > 120$ мин).

В режиме пульсирующего поля ($\varphi_B = \varphi_C = 0^\circ$) выраженное крупномасштабное течение отсутствует. Мелкомасштабные течения разрушают крупномасштабный конвективный вихрь, обеспечивая гомогенизацию температуры во высоте слоя и сглаживая фронт кристаллизации.

На рис. 12 представлены диаграммы средней скорости движения фронта кристаллизации U_{avr} и среднеквадратичного разброса скоростей U_{RMS} фронта кристаллизации по высоте слоя в зависимости от величины питания перемешивателя. Скорость кристаллизации слабо зависит от режима питания, тем не менее наибольшая скорость наблюдается при слабоинтенсивных течениях ($\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 210^\circ$ и $\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$), а наименьшая — в режиме пульсирующего поля ($\varphi_B = \varphi_C = 0^\circ$). В то же время среди всех рассмотренных режимов именно режим пульсирующего поля обеспечивает наиболее существенное сглаживание фронта кристаллизации. Трехвихревое течение ($\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$), топология которого меняется в процессе кристаллизации, приводит к неравномерности движения фронта.

5. Выводы. В ходе экспериментального исследования процесса кристаллизации галлиевого сплава в прямоугольной плоской кювете при внешнем электромагнитном воздействии показана возможность эффективного управления скоростью и однородностью кристаллизации посредством изменения параметров питания электромагнитного перемешивателя.

Показано, что в процессе кристаллизации эффективность перемешивания увеличивается с увеличением интенсивности электромагнитного воздействия бегущего магнитного

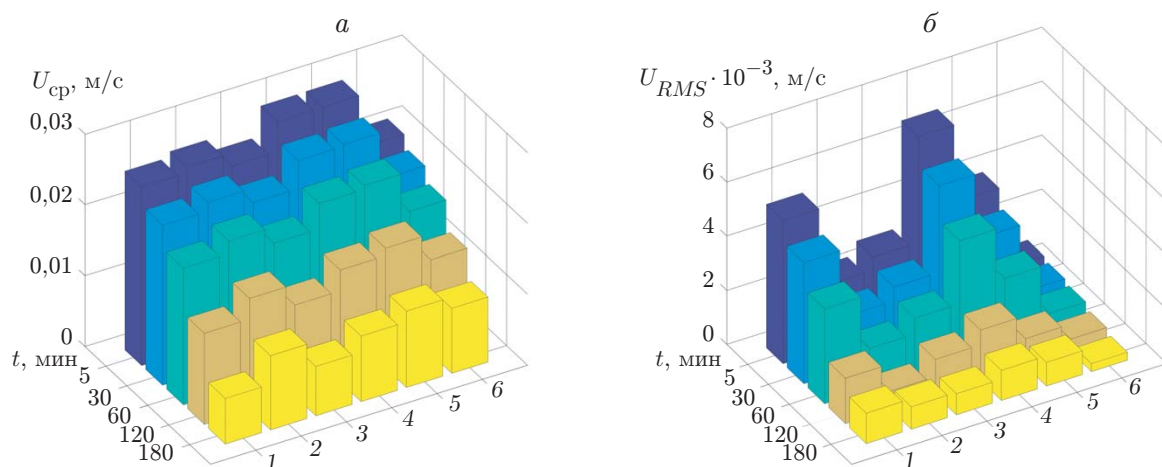


Рис. 12. Зависимости средней скорости движения фронта кристаллизации (а) и среднеквадратичного разброса скорости фронта кристаллизации по высоте слоя (б) от режима питания ЛИМ в различные моменты времени:

1 — $\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 240^\circ$, 2 — $\varphi_B = 120^\circ$, $\varphi_C = 90^\circ$, 3 — $\varphi_B = 270^\circ$, $\varphi_C = 300^\circ$, 4 — $\varphi_B = 240^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$, 5 — $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 210^\circ$, 6 — $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ$

поля. Высокоинтенсивное течение приводит к существенному уменьшению скорости кристаллизации и нарушению равномерности движения фронта. Путем перебора амплитуды электромагнитных сил (изменения силы тока питания ЛИМ) выбран режим ($F = 4,2 \cdot 10^4$), характеризующийся интенсивным перемешивающим течением и существенной неоднородностью фронта кристаллизации. Для данного режима показана возможность управления процессом за счет изменения фазных углов.

Установлено, что изменение фазных углов токов питания ЛИМ позволяет существенно изменять топологию гидродинамических потоков расплава при постоянной величине питания перемешивателя ($F = \text{const}$), что, в свою очередь, приводит к изменению характеристик теплообмена и, следовательно, условий в окрестности межфазной границы. Это позволяет опосредованно влиять на однородность фронта кристаллизации и, в меньшей степени, на скорость фазового перехода.

Наилучшим режимом с точки зрения сглаживания фронта кристаллизации и обеспечения приемлемой скорости является режим пульсирующего поля. Возникающие мелкомасштабные вихревые структуры уменьшают воздействие градиента температуры и разрушают крупномасштабную конвективную циркуляцию расплава.

Важным является учет тепловой конвекции даже в условиях вынужденного перемешивания. Несмотря на то что характерные скорости вынужденных течений в несколько раз больше скоростей конвективных потоков, термогравитационный механизм оказывает существенное влияние на динамику жидкости в застойных областях, а также при слабоинтенсивных течениях. В частности, тепловая конвекция может привести к образованию дополнительных вихревых структур вблизи теплообменников, что препятствует кристаллизации металла. В условиях промышленного производства слитков и изделий из тугоплавких металлов влияние конвективного механизма возрастает за счет больших градиентов температуры и существенно больших масштабов изложниц, тиглей и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дубоделов В. И.** Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики // Процессы литья. 1998. Т. 3. С. 36–43.
2. **Протокилов И. В.** МГД-технологии в металлургии (обзор) // Общие вопр. металлургии. 2011. Т. 4. С. 32–41.
3. **Eckert S., Nikrityuk P. A., Rabiger D., et al.** Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field. Pt 1. Flow field in a liquid metal column // Metallurg. Materials Transact. B. 2007. V. 38. P. 977–988.
4. **Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A., et al.** Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field. Pt 2. Application to solidification of Al–Si alloys // Metallurg. Materials Transact. B. 2008. V. 39. P. 304–316.
5. **Мошинский А. И., Сибирев М. И.** Массовая кристаллизация с учетом пульсаций скорости роста кристаллов // ПМТФ. 1984. № 6. С. 102–107.
6. **Scepanakis M., Jakovich A., Nacke B.** Homogenization of non-conductive particles in em induced metal flow in a cylindrical vessel // Magnetohydrodynamics. 2010. V. 46. P. 413–429.
7. **Повх И. Л.** Магнитная гидродинамика в металлургии / И. Л. Повх, А. Б. Капуста, Б. В. Черкин. М.: Металлургия, 1974.
8. **Хрипченко С. Ю.** Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
9. **Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K.** Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors. Pt 1. Theory and experiments with cold models // Metallurg. Transact. B. 1988. V. 19, N 4. P. 581–593.
10. **Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K.** Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors. Pt 2. Computation of flow fields in billets, blooms, and slabs of steel // Metallurg. Transact. B. 1988. V. 19, N 4. P. 595–602.
11. **Gershuni G. Z.** Convective stability of incompressible fluids / G. Z. Gershuni, E. M. Zhukhovitskii. Jerusalem: IPST, 1976.
12. **Shvydkiy E., Sokolov I., Kolesnichenko I., Losev G.** The influence of liquid — solid interface position and shape on the electromagnetic forcing parameter during horizontal solidification // Metallurg. Materials Transact. B. 2021. V. 52, N 4. P. 1997–2007.
13. **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. V. 57, N 1. P. 85–94.
14. **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.
15. **Losev G., Kolesnichenko I.** The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // Flow Measurement Instrument. 2020. V. 75. 101786.
16. **Mordant N., Pinton J.-F.** Velocity measurement of a settling sphere // Europ. Phys. J. B. 2000. V. 18, N 2. P. 343–352.
17. **Zhang C., Eckert S., Gerbeth G.** Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field // Intern. J. Multiphase Flow. 2005. V. 31, N 7. P. 824–842.
18. **Oborin P., Kolesnichenko I.** Application of the ultrasonic Doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // Magnetohydrodynamics. 2013. V. 49, N 1/2. P. 231–236.
19. **Losev G. L., Kolesnichenko I. V., Khalilov R. I.** Control of the metal crystallization process by the modulated traveling magnetic field // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1128. 012051.

20. **Eckert S., Gerbeth G., Melnikov V. I.** Velocity measurements at high temperatures by ultrasound Doppler velocimetry using an acoustic wave guide // Experiments Fluids. 2003. V. 35. P. 381–388.
21. **Лосев Г. Л., Мамыкин А. Д.** Анализ формы и темпа продвижения твердой фазы при направленной кристаллизации цветных металлов с электромагнитным воздействием ультразвуковым и температурным методами // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2022. Вып. 4. С. 170–179.
22. **Lantzsch R., Galindo V., Grants I., et al.** Experimental and numerical results on the fluid flow driven by a traveling magnetic field // J. Crystal Growth. 2007. V. 305, N 1. P. 249–256.

*Поступила в редакцию 28/VI 2024 г.,
после доработки — 21/VIII 2024 г.
Принята к публикации 2/IX 2024 г.*
