

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ *

И.В. Колесниченко, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.И. Халилов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.М. Павлинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Д. Мамыкин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Г.Л. Лосев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Павлинов А.М., Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л. Генерация течения жидкого металла при моделировании металлургических процессов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2021. – № 4. – С. 62–68. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.4.6>

В работе изучаются способы создания течения жидкого металла с помощью электромагнитных сил, а также сами течения и сопровождающие их процессы. Рассматриваемые процессы возникают при моделировании металлургических технологий на разрабатываемом для этих целей стенде. Получены зависимости формы фронта кристаллизации от вида бегущего магнитного поля в прямоугольной ячейке. Найдены зависимости перепада давления от расхода жидкого металла, созданного кондукционным механизмом в прямоугольном канале. Получены зависимости производительности насоса бегущего поля с коаксиальным цилиндрическим каналом от частоты питающего тока.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, бегущее магнитное поле, кристаллизация, жидкий металл.

Введение

Расплавленный металл является электропроводной жидкостью. В такой жидкости с помощью объемных электромагнитных сил можно создать течения. Ключевой особенностью является возможность создания сил бесконтактным способом. В работе изучаются процессы, в которых переменное магнитное поле действует на объем с электропроводной жидкостью. В ней будет генерироваться вихревой электрический ток; его взаимодействие с исходным магнитным полем

приведет к возникновению электромагнитной силы. Наиболее удобно генерировать электромагнитную силу с помощью бегущего магнитного поля. Использование этого способа предоставляет широкие возможности для управления формой и интенсивностью создаваемого течения электропроводной жидкости. Для этого можно изменять пространственную конфигурацию магнитного поля, его интенсивность (амплитуду) и временную частоту. Также изучается кондукционный способ генерации силы.

* Статья подготовлена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 17-48-590539-р_а.

Целью работы является определение зависимостей темпа кристаллизации, формы границы раздела фаз, а также гидродинамических характеристик течения и других процессов от пространственных и физических характеристик магнитных полей, создающих электромагнитную силу.

Мотивацией для данного исследования являются потребности металлургических производств в совершенствовании технологий обработки цветного металла. Для всестороннего исследования служит разрабатываемый металлургический стенд, который, с одной стороны, моделирует металлургические процессы, с другой стороны – сам является законченной малогабаритной установкой с возможностью масштабирования и применения на реальных производствах (рис. 1).

Основным компонентом стенда является тигель для плавки металла или сплава с линейной индукционной машиной для перемешивания. Из тигля металл подается с помощью электромагнитного насоса в разливочное устройство. При

разливке металла напрямую в литейные формы получается грязный металл плохого качества. Поэтому из разливочного устройства металл попадает в цилиндрический кристаллизатор. Кристаллизатор помещен в индуктор, создающий бегущее и вращающееся магнитные поля, что существенно улучшает внутреннюю структуру и боковую поверхность слитка. Вдобавок, к главному тиглю подсоединен замкнутый дополнительный канал, в котором создается циркулирующее течение с помощью второго электромагнитного насоса. В этот канал встраивается очистное устройство, которое разделяет расплав на компоненты, тем самым сепарируя его. В итоге, загрузив загрязненный металл в тигель, расплавив его с перемешиванием, выполняя сепарацию, можно разлить с перемешиванием получившийся расплав в цилиндрические слитки хорошего качества.

В данной работе рассматриваются только процессы генерации течения и их воздействия на процесс кристаллизации

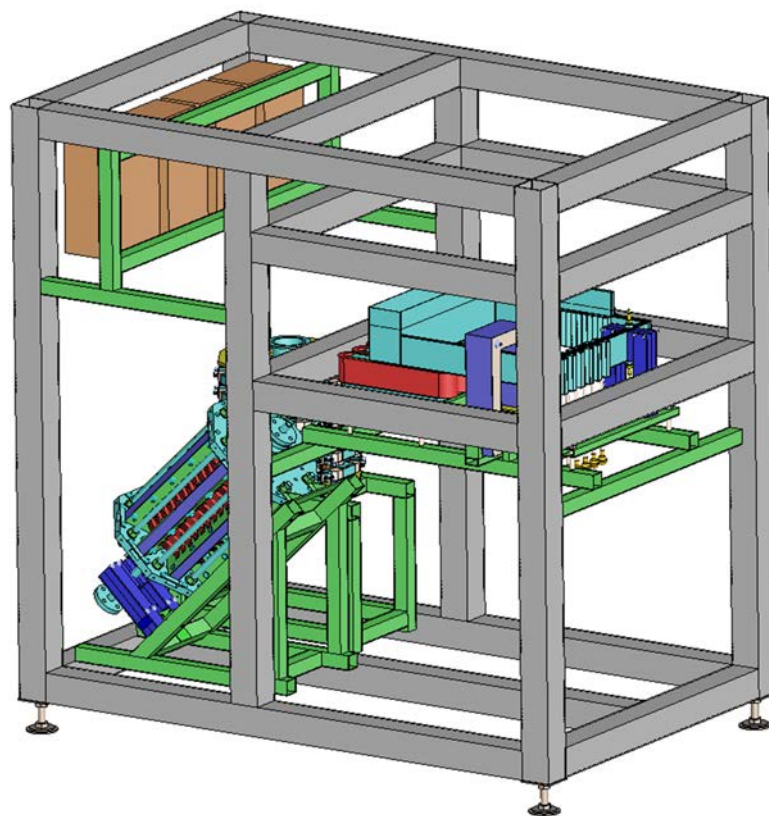


Рис. 1. 3D-модель многофункционального металлургического стенда

Генерация течения с помощью бегущего магнитного поля в прямоугольной ячейке для управления кристаллизацией жидкого металла

В этой задаче бегущее магнитное поле создается индуктором, который генерирует в жидком металле электромагнитную силу, вызывающую течение жидкого металла бесконтактным образом в ходе процесса кристаллизации [3]. Экспериментальная установка для гидродинамических исследований состояла из вертикального плексигласового канала, заполненного жидким галлиевым сплавом (рис. 2; 3, а). Канал размещался на линейном индукторе бегущего поля. Магнитное поле создавалось шестью катушками, питание которых осуществлялось от трёхфазного программируемого источника тока Pacific Smart Source 360 ASX-

URC3. Данный источник позволяет задавать форму выходного сигнала и осуществлять модуляцию бегущего магнитного поля. Измерение скорости возникающих в жидком металле течений осуществлялось при помощи ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 2000, Signal Processing. Четыре датчика УДА размещались на торцевой стенке канала, обеспечивая измерения продольной компоненты скорости течения на нескольких высотах (рис. 3, а).

В результате исследования были найдены формы фронтов кристаллизации и скорости фазового перехода при различных режимах управления индуктора. Установлено, что неограниченное повышение мощности индуктора не является оптимальным для перемешивания жидкой фазы и обеспечения гладкости фронта кристаллической фазы – существует ло-

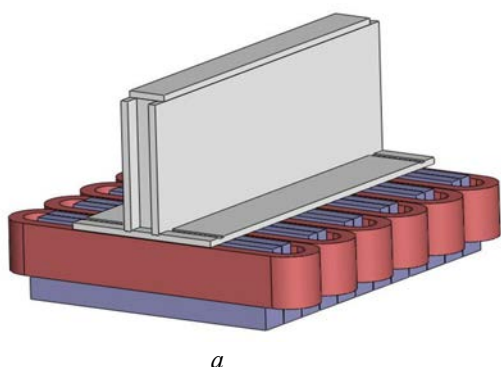


Рис. 2. 3D-модель установки (а); фото установки (б)

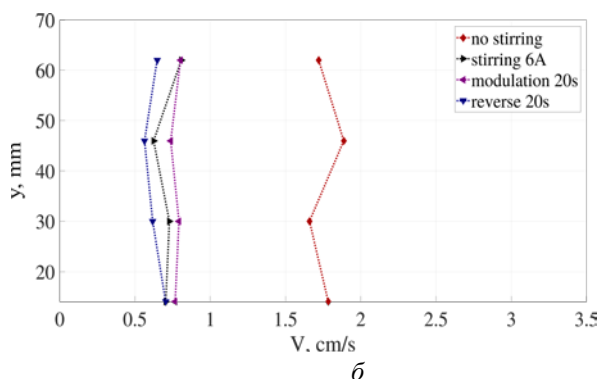
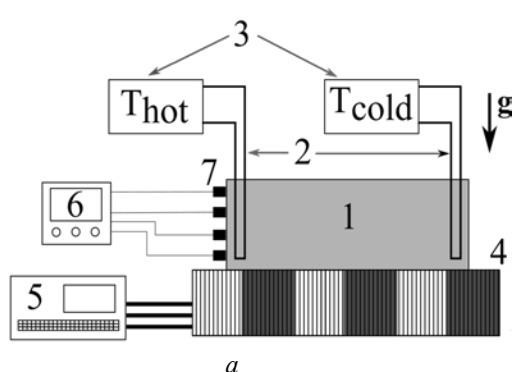


Рис. 3. Схема эксперимента (а): 1 – жидкий металл, 2 – теплообменники, 3 – термостаты, 4 – индуктор, 5 – источник питания, 6 – УДА, 7 – датчики; характеристика неровности фронта кристаллизации в зависимости от режима модуляции (б): no stirring – кристаллизация без принудительного перемешивания, stirring – перемешивание обычным полем, reverse – перемешивание жидкости полем с реверсной модуляцией, modulation – перемешивание жидкости полем с гармонической модуляцией

кальный минимум параметра неровности фронта кристаллизации в зависимости от тока питания индуктора. Режим реверсных модуляций создаёт наибольшую пульсационную составляющую течений жидкости. Так же существует локальный минимум параметра неровности фронта кристаллизации в зависимости частоты реверсной модуляции.

На рис. 3, б приведено сравнение формы фронтов кристаллизации для четырёх режимов фазового перехода: кристаллизации без принудительного перемешивания, кристаллизации при перемешивании немодулированным полем, перемешивании гармонически модулированным полем и полем с реверсной модуляцией. Наилучший эффект обеспечения однородности фронта кристаллизации обеспечивает гармоническая модуляция бегущего магнитного поля.

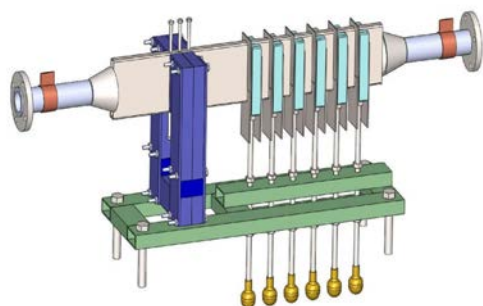
Генерация транзитного течения жидкого металла в прямоугольном канале с помощью кондукционного механизма

При разработке МГД-насосов для литья жидких металлов в силу их высокой активности и, как следствие, малого срока службы контактирующих элементов конструкции, важной задачей является создание максимально простых каналов, недорогих в изготовлении [2]. В индукционных насосах с бегущим магнитным полем наличие обмоток индукторов существенно ограничивает температурный диапазон их применения и требует использо-

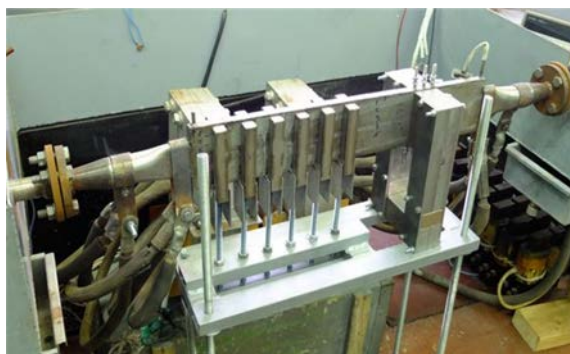
вания системы охлаждения. Безобмоточные МГД-насосы, работа которых основана на взаимодействии продольного тока в канале с собственным магнитным полем, могут работать в горячей зоне производства. Такой насос представляет собой металлический канал (рис. 4), гидравлически соединенный с контуром для перекачивания металла и электрически подключаемый к источнику постоянного или переменного тока большой величины.

На канал надеты ферромагнитные сердечники. Электрический ток генерирует собственное магнитное поле, которое попадает в сердечники. Намагничиваясь, они концентрируют индукцию магнитного поля в зазоре, при этом её направление становится перпендикулярным направлению пропускаемого электрического тока. Возникающая при этом в находящемся в зазоре объеме жидкого металла электромагнитная сила генерирует транзитное течение через канал, что обусловлено наличием в нём перегородок. Для обеспечения возможности регулировки рабочих параметров таких насосов, как правило, прибегают к изменению величины питающего тока.

Предложен новый способ регулировки выходных характеристик путём механического изменения глубины посадки сердечников на канал, на основе которого был разработан и изготовлен электромагнитный насос. Проведены испытания насоса на галлиевом контуре ИМСС УрО РАН (рис. 5, а). Аппаратура контура позволяет изменять гидравлическое сопро-



а



б

Рис. 4. 3D-модель устройства (а), фото устройства (б)

тивление контура и измерять перепад давления, развиваемый насосом, расход галлиевого сплава и ток, пропускаемый по каналу насоса. В эксперименте проводилось измерение перепада давления в стопорном режиме и перепада давления при меняющемся расходе для различной степени перекрытия канала сердечниками и их разном количестве. В результате анализа определены расходно-напорные характеристики канала при разной степени перекрытия сердечников на канал (рис. 5, б).

Генерация транзитного течения в коаксиальном цилиндрическом канале с помощью бегущего магнитного поля

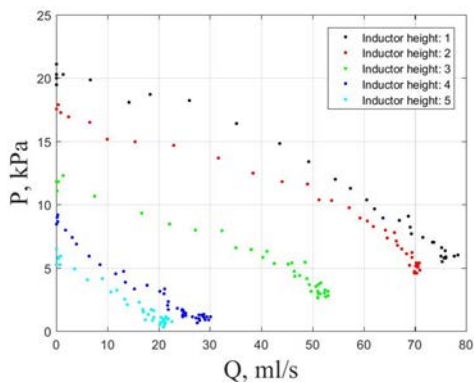
Индукционные насосы находят широкое применение как в металлургии, так и в атомной промышленности [1] для создания циркуляции жидкометаллического теплоносителя. При этом для каждой конкретной задачи нет универсальной

конструкции, что вызывает необходимость поиска наилучших параметров устройства. Для разработки насосов данного типа выполнено исследование процессов в проводящей жидкости в коаксиальном цилиндрическом канале под воздействием внешнего переменного бегущего магнитного поля (рис. 6).

Бегущее магнитное поле приводит к появлению электромагнитной силы, вызывающей течение электропроводной жидкости. Рассматривался коаксиальный кольцевой канал, состоящий из двух вложенных труб разного диаметра. Величина силы существенно зависит от частоты поля, соотношения скорости дрейфа поля и средней скорости течения. От толщины кольцевого канала обратно пропорционально зависит значение магнитного поля, т.к. канал является зазором магнитной системы. При этом параметры канала существенно влияют на характеристики течения, которые изучались на галлиевом контуре ИМСС УрО РАН.

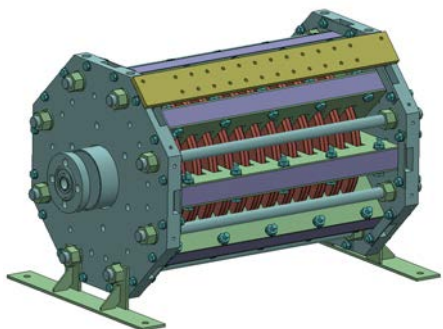


а



б

Рис. 5. Фото контура (а), P-Q характеристика (б)



а



б

Рис. 6. 3D-модель устройства (а), фото устройства (б)

Эксперименты проведены для двух типов подключения обмоток. При первом типе подключения обмотки включаются по одной (рис. 7, а), при втором типе – попарно, что меняет скорость дрейфа и, как следствие, скольжение. Для всех полученных величин наблюдается немонотонная зависимость от частоты тока. Так же, на основе данных гидравлических испытаний (расходно-напорных характеристик), был выполнен анализ мощности создаваемого насосом течения (рис. 7, б). Для каждой частоты тока по аппроксимирующей кривой был найден экстремум, соответствующий максимальной оценочной интенсивности течения.

Обнаружено, что производительность насоса существенно зависит от частоты питающего тока (рис. 8). Оптимальная частота, при которой наблюдается макси-

мальная производительность, также зависит от типа подключения обмоток к трехфазной сети питания. Получено, что производительность насоса при втором типе подключения почти в 1,5 раза выше, чем при первом типе подключения.

Закключение

Результаты исследования являются чрезвычайно значимыми для совершенствования больших и малых металлургических производств. Для этого изучены задачи, связанные с бесконтактным электромагнитным воздействием на расплавленные цветные металлы. Найдены режимы, при которых происходит наиболее эффективное развитие процессов. Результаты необходимы для поиска наилучших режимов работы металлургического стенда, на котором производится моделирование процес-

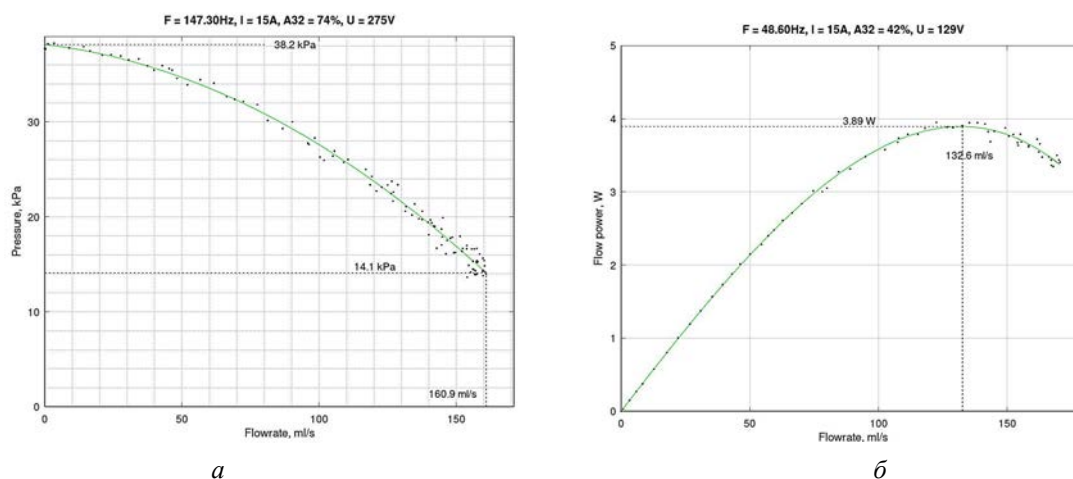


Рис. 7. P-Q характеристика (а), изменение мощности течения в зависимости от расхода (I=15A) (б)

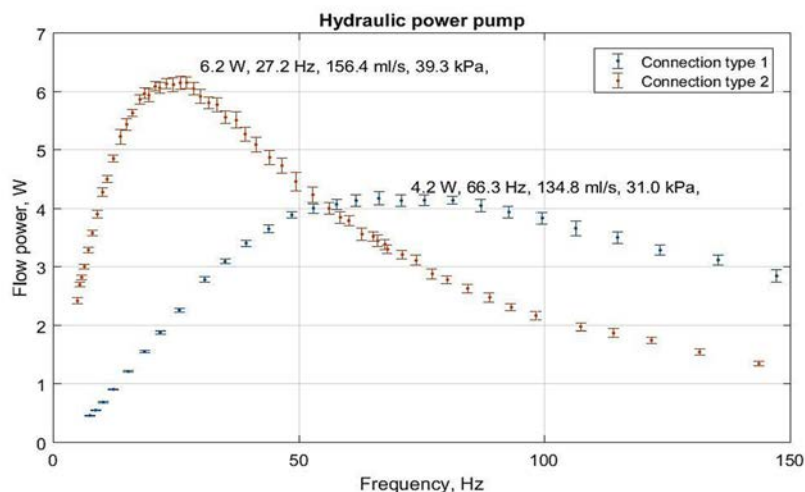


Рис. 8. Зависимость гидравлической мощности от частоты тока

сов реальных производств. Выполненная конструкторская проработка элементов стенда и их трехмерные виртуальные модели позволят быстро изменить его конфигурацию в соответствии с требованиями реальных производств. Конструкция стенда

позволяет добавить или исключить какой-либо компонент. Стенд уже может быть использован малыми предприятиями для вторичной переработки металла, а также создания новых сплавов и сплавов с улучшенными свойствами.

Библиографический список

1. *Ivanov S., Flerov A.* Electromagnetic pump for a liquid metal spallation target: Calculation, diagnostics, reliability // *Magnetohydrodynamics*. – 2009. – Vol. 45. – P. 239–244.
2. *Morinigo D., Rodrigues M., Rivas A., Duque O., Vazquez V., Maroto J., Cuesta R.* Experimental and computational investigation of an electromagnetic pump used for manufacturing aluminium parts // *Magnetohydrodynamics*. – 2007. – Vol. 43. – P. 119–134.
3. *Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rabiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G.* Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. application to solidification of Al-Si alloys // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2008. – Vol. 39. – P. 304–316.

GENERATING LIQUID METAL FLOW IN MODELING THE METALLURGICAL PROCESSES

I.V. Kolesnichenko, R.I. Khalilov, A.M. Pavlinov, A.D. Mamykin, G.L. Losev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I., Pavlinov A.M., Mamykin A.D., Losev G.L. Generating liquid metal flow in modeling the metallurgical processes // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2021. – № 4. – P. 62–68. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.4.6>

In this work, methods of generating a flow of liquid metal using electromagnetic forces are studied, as well as the flows and the accompanying processes. The processes under consideration arise when modeling metallurgical technologies using setup developed for these purposes. The dependence of the shape of the crystallization front on the type of the traveling magnetic field in a rectangular cell is obtained. The dependence of the pressure drop on the flow rate of the liquid metal created by the conduction mechanism in a rectangular channel are found. The dependence of the productivity of a traveling field pump with a coaxial cylindrical channel on the frequency of the supply current are obtained.

Keywords: magnetohydrodynamics, traveling magnetic field, crystallization, liquid metal.

Сведения об авторах

Колесниченко Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией технологической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614109, г. Пермь, ул. Королева 1; e-mail: kiv@icmm.ru

Халилов Руслан Ильдусович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: khalilov@icmm.ru

Павлинов Александр Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: ram@icmm.ru

Мамыкин Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: mad@icmm.ru

Лосев Геннадий Леонидович, младший научный сотрудник лаборатории технологической гидродинамики, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: losev.g@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 01.04.2021 г.