

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЕ (МГД) УСТРОЙСТВА

Металлургические МГД-технологии подразделяют на три группы. К первой группе относятся МГД-устройства для создания потока металлического расплава и управления им; специфической задачей здесь является оптимизация параметров МГД-устройств, включающих насосы, вентили, дроссели, дозаторы, диспергаторы и др. Ко второй группе относятся высокоточные МГД-установки: электропечи, электролизеры, МГД-эффекты которым присущи по принципу их действия; специфическая задача в данном случае – создать условия, при которых технологический процесс идет с наибольшим экономическим эффектом. Наконец, третья группа включает новейшие МГД-технологии: сепарацию смесей, рафинирование металла, бестигельную плавку, получение композитных материалов и др.; специфической задачей здесь является разработка методик расчета и проектирования принципиально новых процессов и установок, их оптимизация [1].

Наряду с отмеченными специфическими задачами комплексно должны решаться и общие задачи электро-, тепло- и гидродинамики, а это возможно только на основе глубоких теоретических исследований, численного и физического моделирования, так как натурные эксперименты в металлургии дороги. В то же время результаты исследований позволяют существенно повысить эффективность металлургических технологий, получить значительную экономию энергетических, материальных и трудовых ресурсов. Комплексный характер МГД-задач предполагает сотрудничество специалистов различных профессий.

Применительно к цветной металлургии нами разработаны оригинальные трансформаторные МГД-устройства с пульсирующим полем для перекачивания, дозирования, перемешивания жидких металлов с температурой до 1000 °С.

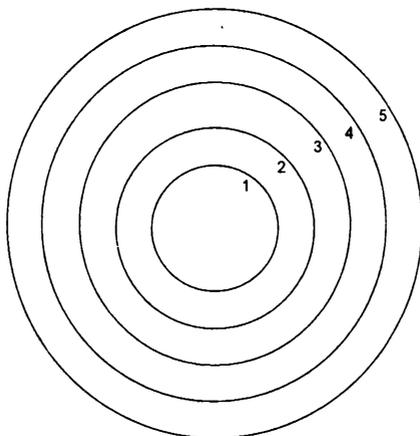
Вскрыты механизмы МГД-взаимодействия и разработаны принципы построения трансформаторных МГД-устройств. В зависимости от вида приложенного пульсирующего поля возможны три основных типа: с электрическим E , магнитным B , скрещенными $E \times B$ -полями. МГД-устройства с E -полем (канал с током в пазу магнитопровода) работает на пинч-эффекте; использование магнитопровода предполагает смещение центров масс

магнито- и токопроводов. В МГД-устройствах *B*-типа (обмотка с током и канал на магнитопроводе) используется магнитное давление на проводящую среду, имеет место смещение обмотки относительно канала. В МГД-устройствах с $E \times B$ -полями определяющей является пондеромоторная сила; они несколько сложнее по конструкции, но это компенсируется возможностью гибкого управления процессами в канале, многофункциональностью. Общим в работе всех трех типов трансформаторных МГД-устройств является скин-эффект; МГД-взаимодействие осуществляется в поверхностном слое на длине канала в 3–4 скин-слоя. Это накладывает ограничения на длину канала сверху и снизу: уменьшение длины приводит к проникновению поля за канал и уменьшению напора из-за магнитного противодавления. Удлинение канала приводит к увеличению габаритов и массы насоса. Были разработаны основы теории трансформаторных МГД-устройств. Решены системы уравнений движения проводящей среды в плоских и цилиндрических МГД-каналах с пульсирующим полем с учетом влияющих факторов, получены распределение по каналу индукции, плотности тока, напряженности электрического поля, электромагнитных сил, а также интегральные характеристики – мощность, напор, КПД, коэффициент мощности. Выполнен с помощью ЭВМ численный эксперимент. Определены условия самовозбуждения переменного тока, его стационарные амплитуды, их устойчивость, частота автоколебаний при работе МГД-устройства с $E \times B$ -полем в автономной установке с емкостным и индуктивным возбуждением в генераторном и насосном режимах. Получен комплекс параметров и характеристик, не имеющих аналогов. Введены схемы замещения, получен и проанализирован ряд зависимостей, в частности, мощностей и КПД от шунтирующей проводимости, длины канала, коэффициента нагрузки. Разработана методика расчета трансформаторных МГД-устройств. Выполнен расчет серий МГД-машин, получен ряд расчетных зависимостей и произведен их анализ, показано преимущество МГД-машин по массогабаритным показателям, стоимости. Разработанные трансформаторные МГД-устройства применимы при температурах металлического расплава до 1000 °С, а известные линейные и винтовые индукционные МГД-насосы со сложными индукторами – до 550 °С.

Для освоения температур выше 1000 °С предложены линейно-вихревые асинхронные МГД-насосы. Разработаны принципы построения линейно-вихревых асинхронных МГД-насосов с заданным механизмом МГД-взаи-

модействия: канал в виде круглой трубы в цилиндрическом индукторе, фазы которого выполнены в виде шестиугольного трубчатого змеевика; начала и концы фаз объединены соответственно в две нейтрали, к которым присоединены патрубки для подвода и отвода хладагента, а система шестифазных токов вводится в фазы обмотки трансформаторным способом или кондукционно. Особенностью МГД-насосов является равномерное распределение по поперечному сечению канала продольной компоненты электромагнитной силы.

Варианты выполнения зон 1–5 МГД-устройств (рисунок), зависящие от их технологического назначения, сведены в таблицу, обобщающую предложенную систему цилиндрических линейно-вихревых МГД-устройств (таблица).



Многослойная модель цилиндрического МГД-устройства:
1–5 – слои МГД-устройства

В цилиндрическом канале МГД-насоса индукция, плотность тока, электромагнитная сила трехкомпонентны. Радиальная компонента силы направлена к оси, азимутальная – вращает металл, аксиальная – нагнетает его вдоль канала насоса. Значимость той или иной компоненты силы зависит от технологического назначения МГД-устройства. При использовании его в качестве магистрального насоса вращение металла вредно и его необходимо подавлять, чтобы повысить КПД, увеличить подачу и напор, продлить срок службы канала. Предложены механический и электромагнитный способы подавления вращения и МГД-устройства, реализующие

эти способы; обобщенным МГД-устройством является насос с взаимно зеркальными обмотками, который может работать как в режиме с вращением, когда включена одна обмотка, так и в режиме с подавлением вращения, когда включены обе обмотки. На основе законов движения проводящей среды в электромагнитных полях, а также законов теории цепей с использованием электрических и магнитных схем замещения (интегральных и дифференциальных) построены комплексы физических и математических моделей, позволяющих в сочетании с арсеналом современных методов анализа выполнять глубокие и всесторонние исследования МГД-устройств в статике и динамике в различных режимах. Разработаны основы теории линейно-вихревых МГД-устройств, выполнен в символической форме в относительных единицах анализ течения жидкого металла в магнитных полях цилиндрических каналов, в которых реализован электромагнитный или механический способ подавления вращения металла. Получены локальные и интегральные характеристики, даны рекомендации по конструктивному исполнению МГД-машин. Выполнены экспериментальные исследования на физических моделях.

Система цилиндрических линейно-вихревых МГД-устройств

МГД-устройство	Содержимое слоя				
	1	2	3	4	5
Насос, генератор сепаратор, вентиль	Расплав	Огнеупор	Обмотка	Ферромагнетик	Кожух
Перемешиватель, нагреватель	Хлад-агент	Ферромагнетик	Обмотка	Огнеупор	Расплав
	Ферромагнетик	Ферромагнетик	Обмотка	Огнеупор	Расплав
Погружной насос	Расплав	Огнеупор	Обмотка	Огнеупор	Расплав
Вращатель, уплотнитель	Расплав	Огнеупор	Обмотка	Ферромагнетик	Кожух
МГД-устройство для обработки расплавов	Расплав	Огнеупор	Обмотка	Огнеупор	Расплав
МГД-трубопровод	Расплав	Огнеупор	Обмотка	Теплоизолятор	Кожух

Металлургические МГД-насосы имеют специфические особенности. Из-за наличия толстых огнеупорных стенок каналов, малой длины насосов в них сильнее проявляются поперечный и продольный краевые эффекты,

электромагнитные силы неравномерно распределены в поперечном сечении канала, что приводит к неустойчивости течений. Из-за вихревого характера электромагнитных сил возникают гидродинамические вихри. Поэтому теоретический анализ процессов в МГД-насосе сложен.

Актуальными в металлургии являются задачи автоматизации дозирования жидкого металла, особенно при его разливе. Для дискретного дозирования проблемой является изучение условий, обеспечивающих выдачу доз с небольшими погрешностями. С этой проблемой связан анализ устойчивости течения, расчет потоков при неоднородном распределении сил. При дозировании непрерывной струей используются МГД-дрессели. Обзор работ показывает, что эффективней воздействовать не на струю жидкого металла, что приводит к неустойчивости процесса, а на зону литникового отверстия металлургического агрегата [2].

Частным случаем дозирования, близким к предельному, является диспергирование жидкого металла: превращение его в капельное состояние, рассеивание капель в атмосфере и последующее их затвердевание при свободном падении, в результате чего получается металлическая крупка [3]. Механическое дробление при пропускании струи через решетчатый насадок приводит к быстрому разрушению насадка. Диспергирование струи металла при помощи МГД-гранулятора [3] за счет электромагнитных сил приводит к получению крупки более качественной как по химическому составу, так и по разбросу размеров гранул.

МГД-перемешивание применяется для выравнивания состава сплавов, для измельчения микроструктуры при кристаллизации слитков, устранения дефектов в них. Для этих целей разработан ряд МГД-устройств, могут быть применены и МГД-насосы, в особенности линейно-вихревые, закручивающие струю перекачиваемого металла. Размещение МГД-перемешивателей относительно миксера с жидким металлом определяется условиями тепло-массообмена. Интенсивность перемешивания определяется турбулентными характеристиками потоков. Исследование таких процессов сложно, поэтому они изучены слабо, однако экспериментальные результаты многообещающие, особенно для установок полунепрерывного и непрерывного разлива сплавов на основе меди, стали. Какой МГД-перемешиватель лучше? Где целесообразнее его располагать? Какой режим работы предпочтительней для достижения наибольшего технологического эффекта? Эти вопросы открывают большое поле деятельности перед исследователями.

В электролазерах, где потребляются большие электрические токи (до 250 кА), МГД-эффекты оказывают решающее влияние на процессы, но это до последнего времени не учитывалось при конструировании агрегатов. Большие токи создают мощные магнитные поля. При взаимодействии полей с токами в жидком металле наводятся большие электромагнитные силы, которые вызывают циркуляцию жидкого металла. Если циркуляцию, зачастую неблагоприятную, оптимизировать, то это даст большой экономический эффект.

МГД-эффект является определяющим и в мощных электропечах – канальных, тигельных, дуговых. Индуцированные в расплаве токи взаимодействуют с магнитными полями, что приводит к созданию электромагнитных сил и циркуляции металла в тигле печи. Знание структур потоков позволяет решать ряд задач, как конструкторских (исполнение индукционных единиц, индукторов, их размещение относительно тиглей и т. д.), так и технологических (увеличение стойкости футеровки, легирование расплава, защита зеркала металла шлаками от воздушной атмосферы и т. д.). При организации транзитного потока жидкого металла в каналах индукционных печей тепло, выделяемое в канале, интенсивно переносится в тигель, что позволяет существенно увеличить срок службы футеровки индукционной единицы и повысить удельную мощность печи [4].

Если для индукционных канальных и тигельных печей найден ряд оптимальных решений, то в оптимизации электродуговых печей много нерешенных проблем. Остаются открытыми вопросы, связанные с влиянием высокочастотных электромагнитных полей на неустойчивости, на характер течений. При проектировании мощных печей нового поколения эти проблемы имеют важное значение.

Аналогичные проблемы актуальны в таких современных технологиях, как электрошлаковая сварка, электрошлаковый переплав и др.

Для получения особо чистых и тугоплавких металлов применяется левитационная (бестигельная) плавка [5]. Наведенные электромагнитные силы поддерживают металл в гравитационном поле, а за счет джоулева тепла обеспечивается его расплавление; при этом в металле наблюдается ряд явлений (форма, движение жидкости внутри поверхности, неустойчивости, приводящие к вытеканию металла), требующих исследования. Однако сегодня уже существуют работоспособные конструкции МГД-установок, где используется эффект удержания жидкого металла в поле земного тяготения.

ния на верхней части непрерывно кристаллизующегося слитка, нижняя часть которого уже затвердела. Вопросы устойчивости здесь упрощаются, а слиток получается с зеркальной боковой поверхностью, не требующей последующей обработки, и мелкозернистой структурой, получаемой за счет интенсивного перемешивания жидкой фазы металла. Актуальной остается проблема разливки тяжелых металлов (меди, стали) в электромагнитный кристаллизатор.

Другими оригинальными технологиями являются МГД-сепарация расплавов и МГД-метод получения композиционных материалов [1; 6; 7].

Проблемы получения композиционных материалов из несмешивающихся в обычных условиях металлов (например, алюминий – свинец) трудноразрешимы, так как тяжелый компонент (свинец) оседает на дне даже в случаях перегрева металлов. Композит получается в условиях невесомости, например в космосе, однако стоимость космических исследований высока. Такую технологию можно осуществить на Земле в МГД-сепараторе со скрещенными взаимно перпендикулярным электрическим E и магнитным B полями, куда помещается двухкомпонентный расплав Al-Pb. Плотность электромагнитных сил в каждом из компонентов будет определяться его удельной электропроводностью, а вектор сил направляется коллинеарно силе тяжести. Электропроводность Al больше электропроводности Pb, поэтому электромагнитные силы необходимо направить согласно гравитационному полю и подбором E и B добиться равенства суммарных плотностей всех объемных сил (электромагнитных и гравитационных), действующих на каждый компонент системы. Тогда кажущиеся их удельные веса сравниваются, так как Al квазиутяжеляется больше, чем Pb. После этого систему Al-Pb необходимо нагреть до температуры выше критической, когда достигается полное взаимное растворение компонентов и система становится гомогенной. Затем для получения высококачественного композита систему закристаллизуют при особом тепловом режиме охлаждения. Изготовленные по этой технологии образцы композитов превосходят по качеству композиты, полученные в условиях космоса.

В последние годы в металлургии возникла необходимость создания принципиально новых методов управления физико-химическими процессами в металлических расплавах, что позволит выйти на качественно новый уровень производства. МГД-методы являются одним из способов решения этой проблемы [8–10].

Таким образом, несмотря на достигнутые результаты, поле деятельности в металлургической МГД-технике обширно, включает комплекс исследований, таких, как создание конкурентоспособных МГД-машин нового поколения, исследование распределения плотности электромагнитных сил в МГД-каналах и обусловленных этим гидродинамических структур потоков, разработка математических моделей МГД-машин и изучение их локальных и интегральных электромеханических параметров и характеристик, исследование переходных и установившихся электро- и гидродинамических процессов, проблем устойчивости свободных поверхностей жидкого металла, находящегося под действием электромагнитных сил, расчет турбулентных режимов течений, исследование воздействия электромагнитных сил на тепло- и массообмен в МГД-установке, разработка принципиально новых МГД-технологий.

Получаемые научные результаты исследований МГД-устройств способствуют систематическому обновлению курсов «Электрические машины», «Электротехнологические установки», «Автоматизированные электротехнологические системы», «Технологические основы современного производства», «Электротехника», изучаемых в вузе¹.

Библиографический список

1. *Гельфгат Ю. М.* Металлургические применения магнитной гидродинамики // Магнит. гидродинамика. 1987. № 3.
2. *Гецелев З. Н., Мартынов Г. И.* Расчет электромагнитного давления в индукционном вентиле // Магнит. гидродинамика. 1968. № 1.
3. *Смолин Г. К., Попов Ю. А.* МГД-гранулятор // Тр. Междунар. семинара по электромеханике. Екатеринбург, 1991.
4. *Тир Л. Л., Столов М. Я.* Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. М., 1975.
5. *Глебовский В. Г., Бурцев В. Г.* Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М., 1974.
6. *Смолин Г. К., Смолин Я. Г., Саранулов Ф. Н.* МГД-устройство для получения композиционных сплавов // Физико-химические основы производства металлических сплавов: Тр. Междунар. конф. Алма-Ата, 1990.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 04-06-00464а).

7. Смолин Г. К., Смолин Я. Г., Саранулов Ф. Н. МГД-печи для композиционных сплавов // Физико-химические основы металлургических процессов: Тр. Всесоюз. конф. М., 1991.

8. Сидоров О. Ю., Смолин Г. К. Оценка энтальпии плавления железа методом цепной дроби // Физико-химические основы производства металлургических сплавов: Тр. Междунар. конф. Алма-Ата, 1990.

9. Сидоров О. Ю., Смолин Г. К. Взаимосвязь физико-химических свойств металлургических расплавов с характером их движения под действием внешних сил // Физико-химические основы металлургических процессов: Тр. Всесоюз. конф. М., 1991.

10. Сидоров О. Ю., Смолин Г. К., Саранулов Ф. Н. Влияние физико-химических свойств металлических расплавов на характер их движения в электромагнитном поле // Расплавы. 1993. № 1.

Г. К. Смолин, А. А. Шапуров

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОДНОФАЗНОГО ПОГРУЖНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

В металлургии достаточно часто применяют подогрев жидкого металла в ковше. При нагреве жидких металлов и сплавов с невысокой температурой плавления наиболее удачным представляется использование погружных нагревателей-перемешивателей индукционного типа, которые просты по конструкции и удобны в эксплуатации. Эскиз одного из вариантов такого индукционного устройства [1] представлен на рис. 1.

Устройство содержит электромагнитную систему, состоящую из полого цилиндрического магнитопровода с внутренней расточкой для размещения однофазной обмотки, внутреннего сердечника; в нижней части между магнитопроводом и сердечником до торца обмотки впрессована втулка со сквозными всасывающими осевыми отверстиями.

Устройство погружают в ковш с расплавленным металлом. При этом жидкий металл через сквозные осевые отверстия б заполняет кольцевой канал 1 (см. рис. 1). При включении обмотки в сеть переменного тока возбуждается пульсирующий магнитный поток, силовые линии которого, пронизывая радиально кольцевой канал 1, замыкаются по магнитопроводу 3, ферромагнитной втулке 5 и сердечнику 2. В металле, находящемся в кольцевом ка-