



УДК 669.187.56.001.3

МГД ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ (Обзор)

И. В. Протокилов

Рассмотрены примеры использования магнетогидродинамических (МГД) эффектов в металлургических процессах. Показаны задачи применения электромагнитных воздействий, приведены классификация и принцип работы основных МГД устройств.

Examples of application of magnetohydrodynamic (MHD) effects in metallurgical processes are considered. The tasks of application of electromagnetic effects are shown, classification and principle of operation of main MHD-devices are given.

Ключевые слова: металлургия; магнитная гидродинамика; магнитное поле; электромагнитное воздействие; МГД технологии, кристаллизация металла

Введение. Металлургия традиционно является одной из основных отраслей использования магнетогидродинамических (МГД) эффектов. Это связано с наличием в металлургических печах больших объемов токопроводящих жидкостей — расплавов металлов и шлаков. При этом с учетом специфики металлургического производства (высокие температуры и агрессивные среды) зачастую требуется использование бесконтактных способов силового воздействия на расплавы для решения различных технологических задач, а также управление свойствами выплавляемого металла. Такие воздействия

можно реализовать на основе применения электромагнитных сил.

Работы по созданию металлургических МГД технологий начали активно проводиться с начала 1960-х гг. Сейчас они получили широкое развитие и нашли практическое применение на различных стадиях металлургического передела: при транспортировке и дозировке металлургических расплавов, для интенсификации тепло- и массопереноса в плавильных агрегатах, рафинирования металлов и сплавов, управления процессом кристаллизации слитков и др. (рис. 1) [1–5].

Принцип действия большинства металлургических МГД устройств основан на взаимодействии создаваемого ими внешнего магнитного поля с электрическим током, протекающим в токонесущей жид-

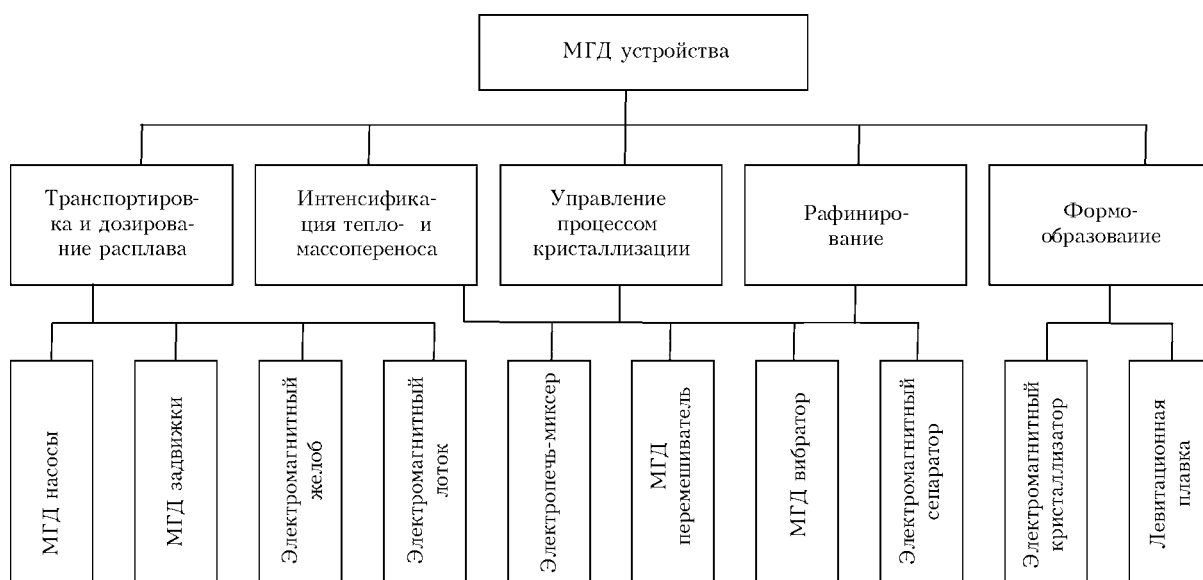


Рис. 1. Назначение и типы металлургических МГД устройств

© И. В. ПРОТОВОКИЛОВ, 2011

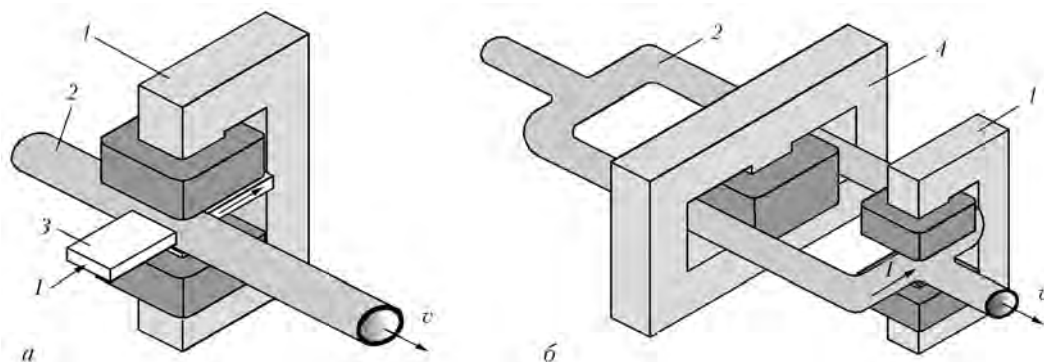


Рис. 2. Принципиальная схема кондукционного (а) и индукционного, трансформаторного типа (б) МГД насосов: 1 – электромагнит; 2 – канал; 3 – токоподвод; 4 – индуктор; I – ток; v – скорость движения расплавов

кости (металлургическом расплаве). В результате такого взаимодействия в жидкой среде возникают объемные электромагнитные силы, приводящие к силовому воздействию на жидкость. Значение и направление этих сил определяются векторным произведением индукции магнитного поля и плотности тока в расплаве. Соответственно, наибольшее значение электромагнитные силы имеют в случае, когда векторы магнитного поля и тока взаимно перпендикулярны (так называемые скрещенные поля).

Следует подчеркнуть, что все металлы в расплавленном состоянии практически немагнитны и для использования электромагнитных сил важно, чтобы среда была проводящей.

По способу создания электрического тока в расплаве МГД устройства делятся на два основных класса: кондукционные (рис. 2, а) и индукционные (рис. 2, б). В устройствах первого типа электри-

ческий ток вводится в расплав непосредственно с помощью специальных токоподводов. Необходимость контактного подвода тока из внешней цепи к высокотемпературным, химически агрессивным расплавам ограничивает применение таких устройств в металлургии. Исключение составляют случаи, когда ток в расплаве обусловлен самим технологическим процессом (например, ток плавки при ЭШП или ВДП). Указанных недостатков лишены устройства второго типа, в которых ток в расплаве возбуждается индукционным способом с помощью переменных электромагнитных полей (пульсирующего, бегущего, вращающегося).

МГД насосы. Одними из первых МГД эффекты стали применяться в устройствах для транспортировки и дозирования жидких металлов (рис. 2–4). Уже в первых описаниях электромагнитных насосов

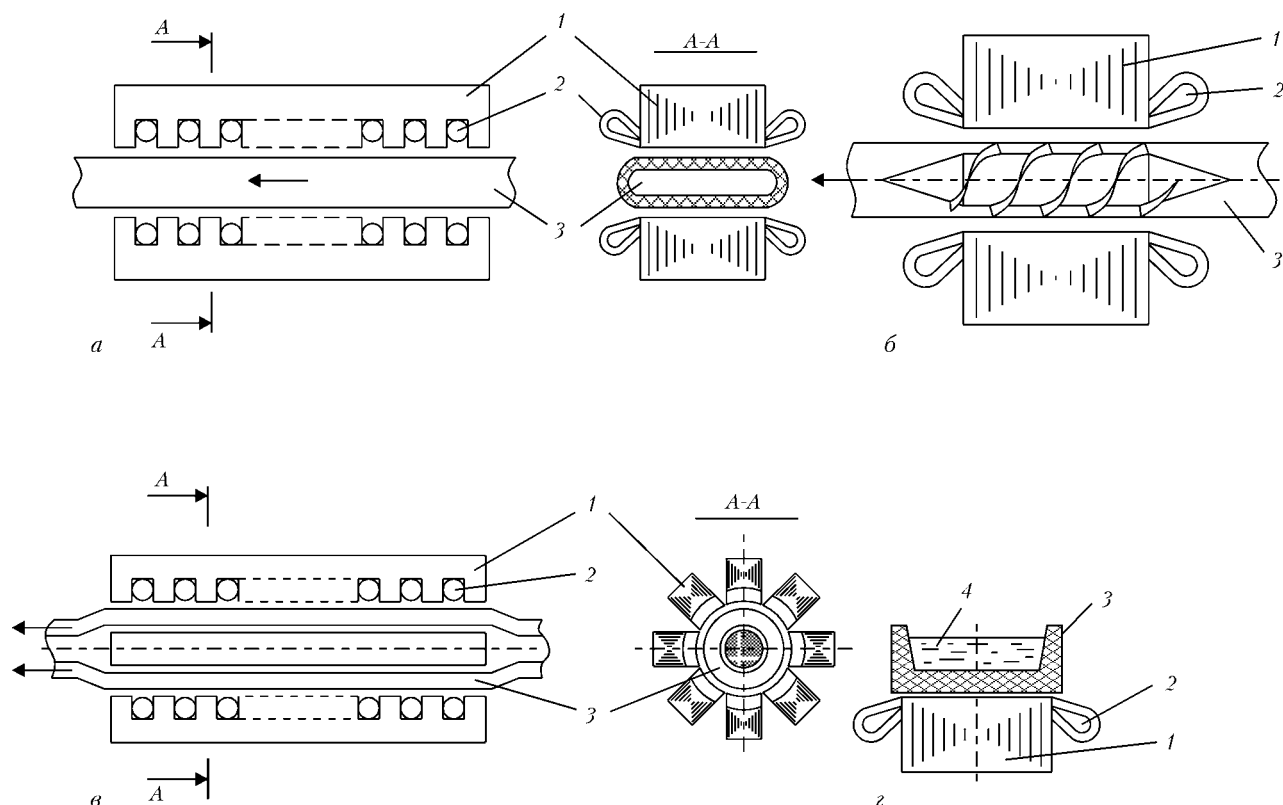


Рис. 3. Индукционные насосы с бегущим магнитным полем (а, е), с вращающимся магнитным полем и винтовым каналом (б), электромагнитный желоб (z): 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – жидкий металл

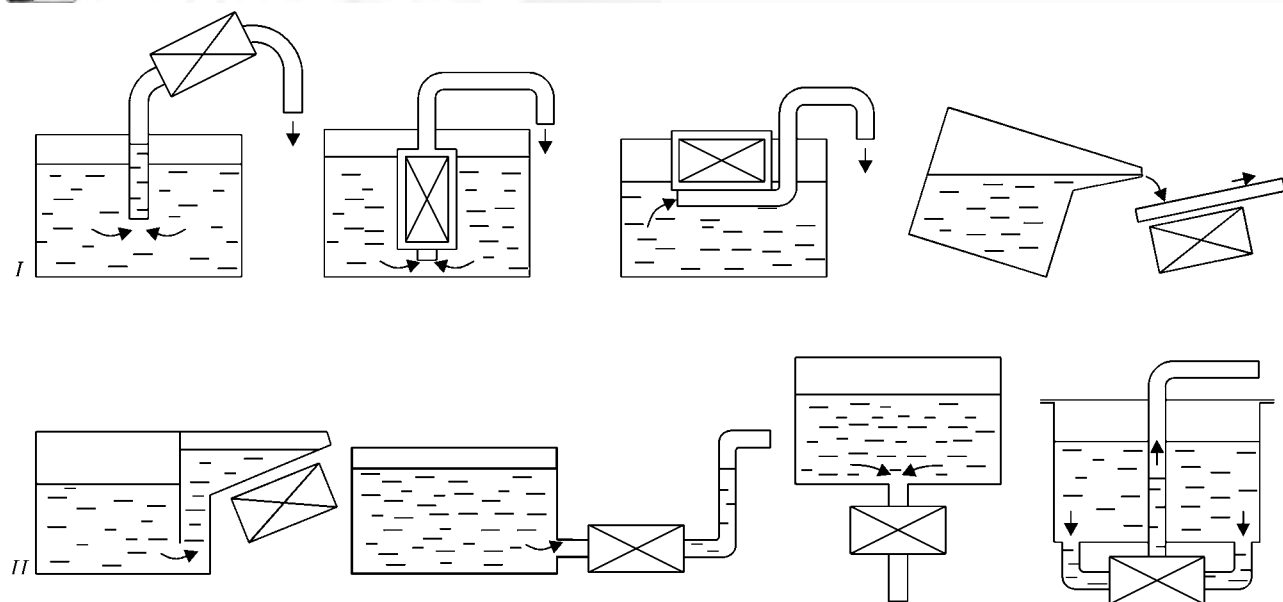


Рис. 4. Схемы компоновки электромагнитных насосов с печами: I — не связан с печью; II — жестко связан с печью

указывается на важнейшие достоинства таких устройств — отсутствие механически движущихся частей, возможность их работы в полностью закрытых, герметичных объемах, плавное регулирование производительности.

Сейчас разработаны и серийно выпускаются большое количество МГД насосов, отличающихся по назначению и конструктивному исполнению (рис. 3) [3, 6, 7]. Принцип их действия основан на создании в активной зоне канала насоса разницы давлений посредством использования объемных электромагнитных сил. Поэтому в большинстве случаев поток в канале насоса является напорным. В электромагнитном желобе, в отличие от насоса, расплав перемещается в виде безнапорного потока, имеющего свободную поверхность (рис. 3, з).

Электромагнитные насосы используют для перекачивания магния, цинка, олова, свинца, галлия,

сплавов на основе алюминия, черных металлов. Их применяют в системах транспортировки и дозированной подачи расплавов в изложницы или литейные формы, для технологического или аварийного выпуска (слива) расплава из ванн емкостей и т. д. Насосы изготовляют как в виде отдельных агрегатов, так и в составе специализированных установок для подогрева, внепечной обработки и разливки сплавов цветных и черных металлов (рис. 4, табл. 1). Разработанные насосы развивают давление до 6 МПа и производительность — до 70 т металла в час при потребляемой мощности до 700 кВт [4, 7].

МГД перемешиватели. Другим, широко используемым в металлургии, классом МГД устройств являются МГД перемешиватели. Принцип их действия основан на бесконтактном воздействии создаваемого ими переменного магнитного поля на то-

Таблица 1. Характеристики некоторых серийно выпускаемых МГД установок [5, 6]

Тип установки	Металл	Выполняемые операции	Полезная масса загрузки ванны, кг	Подача сплава при заливке, кг/с	
				Наименьшая	Наибольшая
МДН-6А-0,16	Алюминий и его сплавы	Подогрев, внепечная обработка и заливка в литейные формы	160	0,3	2,5
МДН-6А-0,25				0,4	3,0
МДН-6А-0,4				0,5	3,0
МДН-6А-0,6				0,6	3,5
99801 (МДН-6С)	Свинец, олово и их сплавы	Плавка, подогрев, доводка и заливка в литейные формы и изложницы	600	0,3	3,0
99411 (99412)	Чугун	Подогрев, внепечная обработка и заливка на центробежных каруселях и автоматических формовочных линиях	2500	0,8	12,0
99413 (МДН-6Ч)				6300	3,0
МДУ-26С-6,3	Сталь	Индукционный подогрев, хранение и периодическая подача в кристаллизатор установки электрошлаковой наплавки прокатных валков	6300	1,0	10,0

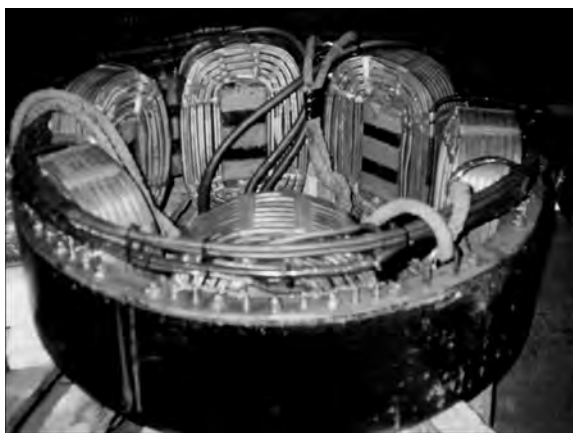


Рис. 5. Внешний вид МГД перемешивателя с вращающимся магнитным полем [8]

копроводящий расплав. Конструктивно системы для электромагнитного перемешивания представляют собой один или несколько индукторов с медными или алюминиевыми обмотками (рис. 5). Чаще всего используется двух- или трехфазный переменный ток частотой 1... 50 Гц при потребляемой мощности 10... 3000 кВт. Существует два основных типа перемешивателей: генерирующих вращающееся и бегущее магнитные поля.

В первом случае электромагнитный перемешиватель является по сути статором асинхронного двигателя (рис. 5), а ротором — жидкий металл. Такой индуктор создает в расплаве азимутальное (вокруг оси ванны) вращение (рис. 6, а). Бегущее магнитное поле генерируется плоско-линейным индуктором, создающим в расплаве течения вдоль полюсов индуктора (рис. 6, б). В некоторых современных перемешивателях используют оба типа индукторов, что дает возможность раздельного управления интенсивностью азимутальных и меридиональных течений [9, 10].

Кроме указанных типов перемешивателей, существуют погружные электромагнитные перемешиватели, опускаемые непосредственно в расплав металлургической печи [1]. Их использование позво-

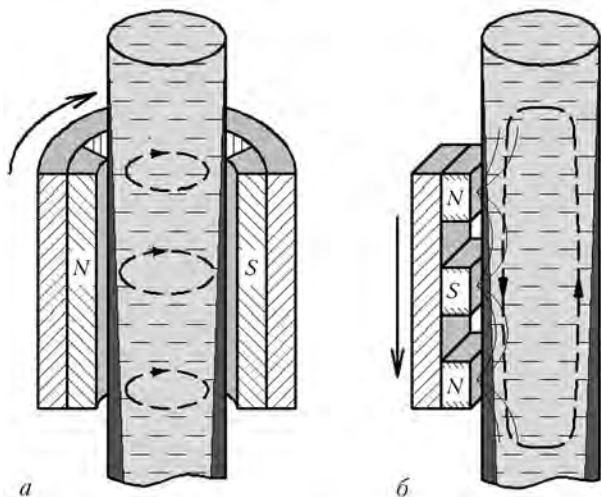


Рис. 6. Схема перемешивания жидкого металла вращающимся (а) и бегущим (б) магнитными полями

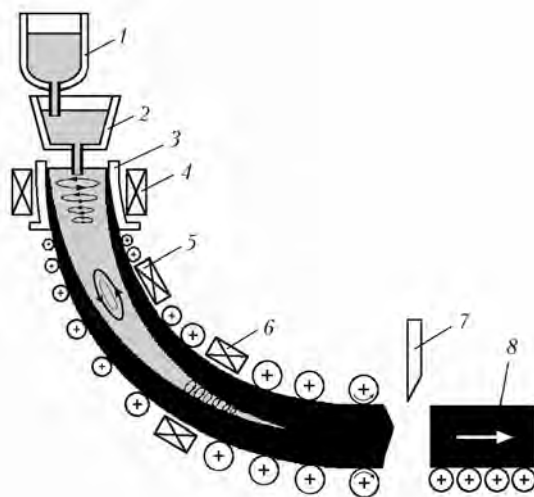


Рис. 7. Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке стали: 1 — разливочный ковш; 2 — промежуточный ковш; 3 — кристаллизатор; 4–6 — ЭМП соответственно в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения, зоне окончания затвердевания; 7 — резак; 8 — мерная заготовка

ляет уменьшить расстояние между индуктором и жидким металлом, поскольку защитная футеровка перемешивателя значительно тоньше футеровки печи, и тем самым увеличить эффективность электромагнитного воздействия.

Машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Широкое применение электромагнитное перемешивание (ЭМП) металла получило при непрерывном литье стальных заготовок [3, 10–13]. В данном случае его используют для решения следующих задач:

- улучшения внутреннего строения заготовки (измельчения структуры, снижения степени ликвации, уменьшения центральной пористости);
- улучшения качества поверхности заготовки (снижения количества поверхностных дефектов, увеличения толщины наружной корочки);
- повышения скорости разливки металла.

В современных МНЛЗ применяются способы многоступенчатого перемешивания в двух или трех уровнях: кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения, зоне окончания затвердевания [11] (рис.7). В кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания непрерывно-литой заготовки устанавливают оборудование, создающее вращающееся магнитное поле, а в средней части МНЛЗ — бегущее.

ЭМП в зоне кристаллизатора позволяет уменьшить центральную ликвацию и пористость заготовки, повысить химическую однородность металла, способствует увеличению теплоотвода и уменьшает вероятность прорыва корочки затвердевшего металла, что, в свою очередь, позволяет повысить производительность процесса разливки.

Перемешивание на финальных участках затвердевания заготовки служит для улучшения качества ее центральной зоны, измельчения структуры металла посредством подавления роста столбчатой кристаллизации и увеличения зоны равноосных кристаллов.

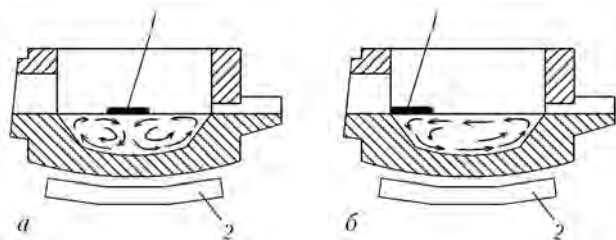


Рис. 8. Движение металла и шлака в дуговой печи при разных режимах работы перемешивателя: *a* – перемешивание; *b* – скачивание шлака; 1 – шлак; 2 – МГД перемешиватель

В целом электромагнитное перемешивание в процессе непрерывной разливки стали позволяет следующее [14]:

- уменьшить количество поверхностных дефектов в 2-3 раза;
- увеличить зону равноосных кристаллов на 50... 100 %;
- уменьшить центральную пористость и ликвацию до 0 баллов;
- повысить скорость разливки на 20... 30 %;
- расширить возможности литья с более высокой температурой перегрева на 10... 15 °С;

увеличить сортамент разливаемых марок сталей, в том числе высокоуглеродистых и специальных (подшипниковых, нержавеющей и инструментальных).

Помимо МГД перемешивателей, в МНЛЗ используют системы с постоянным магнитным полем, снижающие глубину проникновения струи металла в ванне (так называемый способ электромагнитного торможения) [15]. Оборудование включает расположенные вдоль стенок кристаллизатора намагничивающие катушки, создающие сильное магнитное поле, которое замедляет скорость поступающей в кристаллизатор струи металла, благодаря чему неметаллические включения могут быстро всплывать на поверхность мениска. При этом предотвращается размывание корочки узких граней слябовой заготовки, уменьшается содержание включений и микродефектов в ее металле. Применение электромагнитного торможения обеспечивает повышение скорости разливки на 30 % без увеличения загрязненности металла включениями.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Применение ЭМП в ДСП дает возможность ускорять процесс плавки и улучшать качество металла [16, 17]. Так, температурный перепад по глубине ванны ДСП может достигать 100 °С, поскольку дугой непосредственно прогреваются только верхние слои металла. Перемешивание выравнивает температуру металла, интенсифицирует процессы химического взаимодействия, позволяет равномерно распределить легирующие присадки.

Электромагнитное воздействие в ДСП нацелено на выполнение двух основных задач: перемешивание расплава с целью интенсификации тепло- и массообмена, а также облегчение процесса скачивания шлака путем создания направленного движения его к рабочему окну печи.

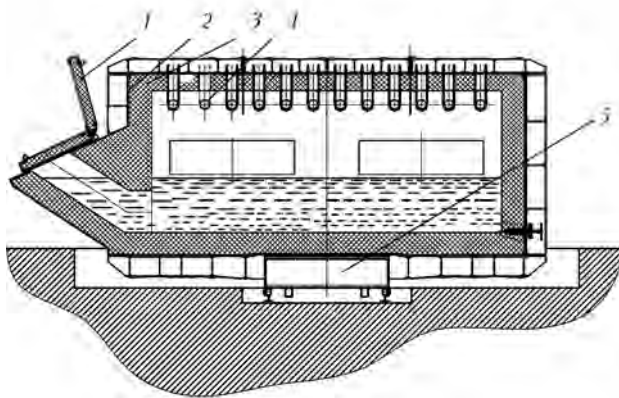


Рис. 9. Камерная электропечь-миксер типа САМП: 1 – заливочная крышка; 2 – кожух; 3 – футеровка; 4 – нагревательные элементы; 5 – МГД перемешиватель

МГД перемешиватель, представляющий собой развернутый статор, устанавливают преимущественно под днищем печи (рис. 8). Обмотки перемешивателя питаются токами частотой от 0,3 до 1,5 Гц, при этом мощность на одну фазу достигает 860 кВт [17].

В режиме перемешивания обмотки статора коммутируются таким образом, чтобы направления движения магнитных полей у сливного носка и рабочего окна были противоположны (рис. 8, *a*). При этом обеспечивается интенсивное вертикальное перемешивание ванны. В режиме скачивания шлака бегущее магнитное поле вызывает движение металла от сливного носка к рабочему окну (рис. 8, *b*). Шлак также сдвигается к рабочему окну, что облегчает его скачивание путем небольшого наклона печи в сторону рабочего окна.

Технико-экономические преимущества от использования ЭМП заключаются в увеличении в среднем на 20 % производительности печи, экономии легирующих элементов, повышении качества выплавляемого металла при сокращении в 2-3 раза брака по неметаллическим включениям [17].

Приготовление и литье алюминиевых сплавов.

Электромагнитное перемешивание широко применяется в алюминиевой промышленности для гомогенизации и рафинирования расплавов в плавильных или раздаточных печах, транспортных ковшах, миксерах, при полунепрерывном литье слитков [18–21].

В миксерах и печах устанавливают преимущественно МГД перемешиватели бегущего магнитного поля, которые размещают в нижней части (днище) миксера или печи, или возле боковой стенки (рис. 9) [18]. Такие перемешиватели в настоящее время эксплуатируются на Саяногорском, Красноярском, Братском, Новокузнецком, Иркутском алюминиевых заводах, предприятиях США, Канады, Франции [19].

Применение ЭМП позволяет эффективнее и с меньшими затратами электроэнергии доводить алюминиевые сплавы до однородности по химическому составу. При этом на 25 % повышается производи-

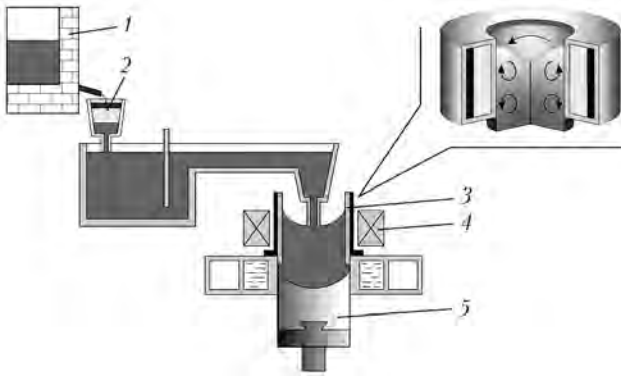


Рис. 10. Схема литья алюминиевых слитков с МГД перемешиванием расплава: 1 – плавильная печь; 2 – фильтр; 3 – тепловая насадка; 4 – МГД перемешиватель; 5 – слиток

тельность процесса, на 15 % уменьшаются количество потребляемой электроэнергии и температурный перепад между зеркалом металла и подиной от 140 до 5... 12 °С, снижается насыщение алюминиевого расплава водородом и его окисление, сокращается количество шлаков на 15... 25 %, а также продолжительность приготовления сплавов [19].

При полунепрерывном литье алюминиевых слитков ЭМП используют с целью равномерного распределения компонентов сплава по сечению слитка и управления формой и размером зерен. Для интенсивного перемешивания жидкой фазы в области кристаллизации расплава применяют МГД перемешиватели, генерирующие течения в горизонтальном и вертикальном направлениях одновременно с возможным раздельным управлением интенсивностью этих движений (рис. 10) [20].

Измельчение зерна деформируемых сплавов при литье с перемешиванием позволяет избегать необходимости их модифицирования путем введения в сплавы ответственного назначения искусственных

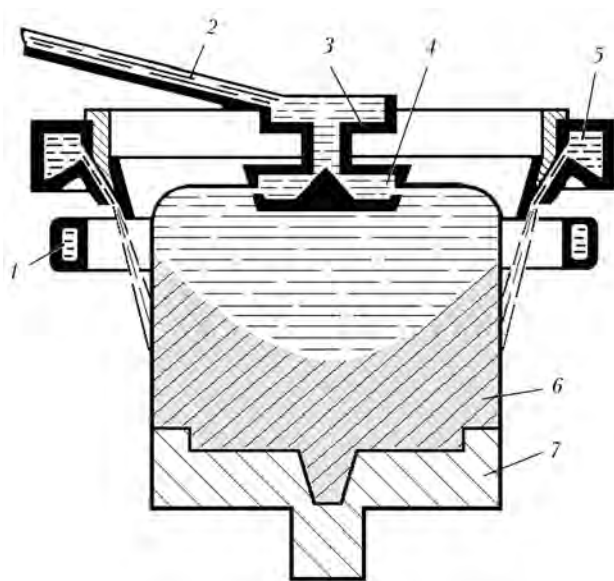


Рис. 11. Схема литья в электромагнитный кристаллизатор [3]: 1 – индуктор; 2 – лоток; 3 – распределительная коробка; 4 – плавающая чаша; 5 – коллектор с охлаждающей жидкостью; 6 – слиток; 7 – поддон

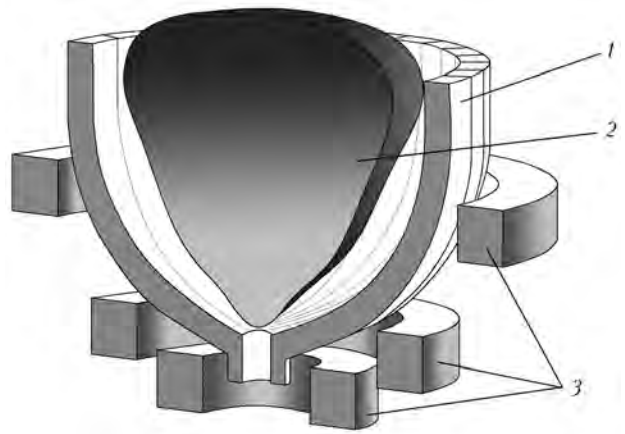


Рис. 12. Схема левитационной плавки в холодном тигле [23]: 1 – холодный тигель (секционный кристаллизатор); 2 – расплавленный металл; 3 – индуктор

центров кристаллизации, что приводит к снижению значений ресурсных характеристик сплава [20].

Бестигельная плавка металлов. Перспективным направлением применения МГД эффектов в металлургии является использование электромагнитных сил для формообразования слитка. Примером такой технологии является литье в электромагнитный кристаллизатор (рис. 11) [3, 22]. Особенность данного процесса состоит в том, что с целью бесконтактного формообразования отливки разливаемый металл подают в электромагнитное поле, удерживающее его в заданных контурах, одновременно осуществляют принудительное охлаждение, обеспечивающее затвердевание отливки. Указанная технология реализована при литье алюминиевых сплавов. Техничко-экономический эффект технологии выражается в повышении качества поверхности слитков, улучшении кристаллической структуры металла, увеличении производительности процесса разливки [3, 22].

Другим примером использования электромагнитных сил для формообразования металла является бестигельная (или левитационная) плавка [23, 24]. Бестигельная плавка без соприкосновения расплава со стенками тигля эффективна при получении сверхчистых металлов и сплавов (титан, цирконий, ванадий, тантал и другие), когда загрязнение металла материалом тигля недопустимо.

Принцип бестигельной плавки основан на индукционном нагреве и электромагнитной левитации (рис. 12). Сформированное индуктором специальной конструкции высокочастотное электромагнитное поле индуцирует в металле вихревые токи, обеспечивающие его нагрев и плавление.

В свою очередь, взаимодействие этих токов с возбуждающим их магнитным полем способствует отжатию от стенок и удержанию расплава во взвешенном состоянии.

Главным недостатком данного способа плавки является ограниченность массы расплава и его устойчивости при нагреве. Количество левитирующе-

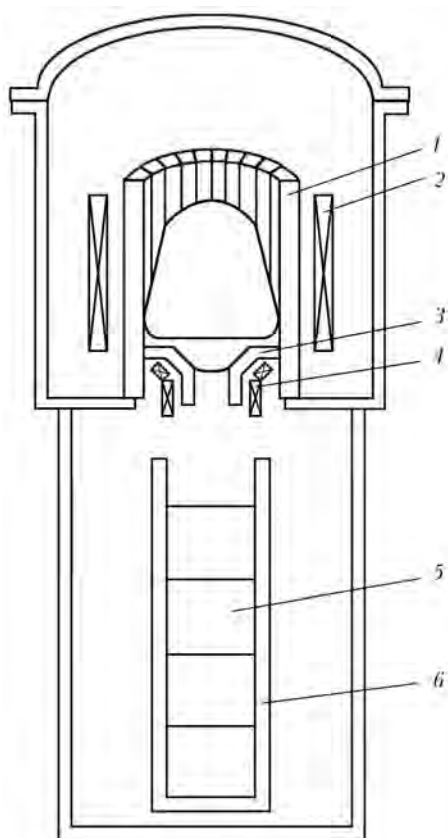


Рис. 13. Схема левитационной плавки в холодном тигле с донным выпуском металла [24]: 1 — холодный тигель (секционный кристаллизатор); 2 — плавильный индуктор; 3 — выпускной патрубок; 4 — выпускной индуктор; 5 — слиток; 6 — изложница

го металла может составлять от нескольких десятков до сотни граммов.

Исследования в этом направлении активно развиваются. Так, в работе [23] путем математического моделирования показана возможность левитации двухкилограммового объема жидкого металла без контакта со стенками холодного тигля. В публикации [24] приведен пример «частичной левитации» до 500 кг жидкого металла в холодном тигле диаметром 600 мм. Данный процесс использовали при получении двухтонного слитка сплава Ti-6Al-4V (рис. 13).

МГД сепарация. В металлургических процессах МГД сепарация применяется для рафинирования металла от пор и включений, а также извлечения металла из шлака [1–3, 25, 26]. Существуют различные механизмы МГД сепарации, основанные на разнице плотности и электропроводности материалов.

Один из механизмов удаления включений основан на изменении удельного веса расплава под действием скрещенных электрического и магнитных полей [3]. Так, искусственное утяжеление жидкого металла приводит к увеличению выталкивающей силы, повышению скорости и эффективности всплытия неметаллических включений или газовых пор. Для удале-

ния включений, плотность которых выше таковой металла, применяется искусственное облегчение расплава, способствующее увеличению скорости их осаждения на дне емкости или канала.

Другой механизм удаления включений основан на создании под действием электромагнитных сил азимутального вращения ванны. Включения с плотностью выше таковой металла под действием центробежных сил вытесняются к стенкам формирующего устройства и при затвердевании металла концентрируются на поверхности заготовки.

При различных значениях электропроводности расплава и взвешенных в нем частиц используют МГД сепарацию, основанную на силе, действующей на частицу при пропускании через расплав электрического тока или наложении магнитного поля [27]. Такой принцип сепарации применяют для удаления, например частиц Cr_3C_2 из сплавов на основе меди [25] и SiC из алюминия [26] и др.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП). Для электронно-лучевых технологий применение электромагнитных воздействий принципиально важно, поскольку до настоящего времени единственным способом воздействия на процесс кристаллизации остается регулирование нагрева поверхности расплава в кристаллизаторе электронным лучом [28].

Использование электромагнитного перемещения при ЭЛП впервые было реализовано в 1970-е гг. в Институте проблем литья НАН Украины [28–30]. Многочисленные исследования, проведенные при плавке сплавов на основе никеля, титана, нержавеющей сталей, циркония, ниобия, меди, показали, что применение ЭМП позволяет уменьшить удельный расход электроэнергии, повысить производительность процесса, сократить потери металла вследствие испарения, уменьшить размер зерен [30]. Важным достоинством ЭМП при ЭЛП является возможность выплавки многокомпонентных сплавов, в том числе содержащих легколетучие элементы.

К настоящему времени разработаны различные кристаллизаторы с системами ЭМП, один из которых показан на рис. 14. Кристаллизатор представляет собой медную водоохлаждаемую цилиндрическую емкость с продольными разрезами в зоне размещения системы ЭМП. Его устанавливают в литейную камеру на одной оси со сливным отверстием плавильного тигля.

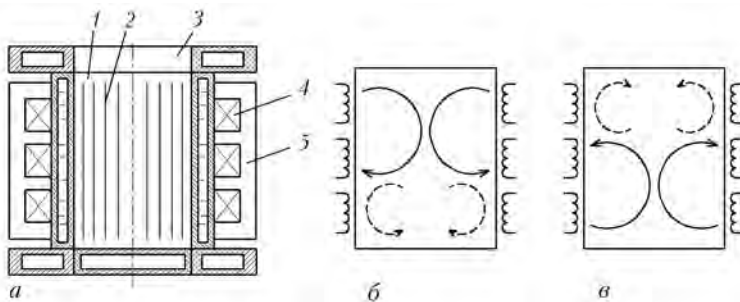


Рис. 14. Схема кристаллизатора с системой ЭМП (а) и возможные контуры циркуляции расплава (б, в) [28]: 1 — медная водоохлаждаемая емкость; 2 — сквозные разрезы; 3 — водоохлаждаемый фланец; 4 — катушки индуктора; 5 — магнитопровод



Таблица 2. Сравнительная характеристика структуры слитков титана, полученных разными способами ЭЛП [30]

Способ плавки	Размер и характерная форма конечного β-зерна, мм	Размер внутризеренных α-колоний, мкм	Толщина α-пластин в колониях, мкм
С ЭМП расплава	6...7 (6 баллов), равноосное	70...100 (2 балла)	5...7 (2 балла)
Без перемешивания	7...12 (9 баллов), эллипсоподобное	80...120 (3 балла)	6...10 (3 балла)

Система ЭМП состоит из катушек индукторов, расположенных вокруг емкости и охваченных магнитопроводом. Питание катушек осуществляется токами промышленной частоты при напряжении 18 В и токе 600 А. В зависимости от схемы подключения питания системы ЭМП возможно создание циркуляции расплава в кристаллизаторе от стенки к центру (рис. 14, б) и от центра к стенке (рис. 14, в) или поочередное знакопеременное перемешивание.

При ЭЛП с ЭМП важно свести к минимуму негативное влияние электромагнитных полей на электронный луч. Последнего достигают с помощью экранирования магнитного поля над верхним срезом кристаллизатора водоохлаждаемым фланцем, выполненным в виде короткозамкнутого витка.

Результаты оценки эффективности использования электромагнитного воздействия при выплавке слитков титана ВТ1-0 представлены в табл. 2.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП). При ВДП электромагнитное воздействие используют как для управления движением металла, так и для стабилизации горения дуги или принудительного ее перемещения по торцу расходуемого электрода [16, 17, 31, 32]. В большинстве случаев электромагнитное устройство представляет собой соленоид постоянного тока, охватывающий кристаллизатор.

Применение соленоидов с осевым магнитным полем стабилизирует дуговой разряд и предотвращает его переброс на стенку кристаллизатора, тем самым снижая взрывоопасность печи.

Результаты применения электромагнитного перемешивания при ВДП для разных сплавов неодинаковы. Перемешивание положительно сказывается на усреднении температуры металла и равномерном распределении легирующих компонентов по объему ванны, а также на структуре титановых сплавов [32].

В то же время азимутальное перемешивание металла может приводить к негативным последствиям, в частности появлению пятнистой ликвации. В первую очередь это относится к сталям и высоколегированным сплавам, склонным к ликвации (ШХ15, ЭИ437БУ и др.) В данном случае принимают специальные меры для торможения циркуляции расплава. Например, рекомендуется перио-

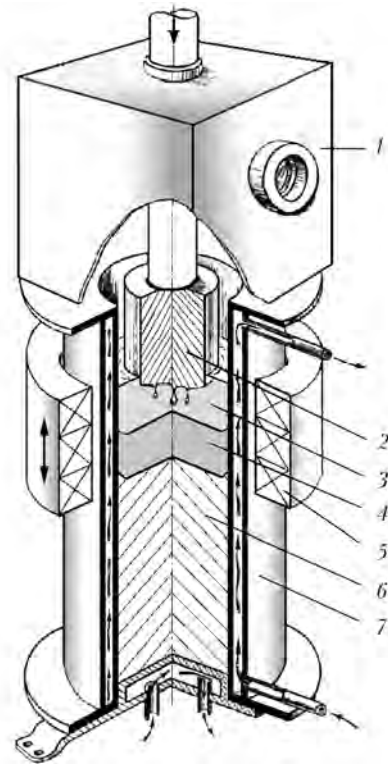


Рис. 15. Схема магнитоуправляемой электрошлаковой плавки: 1 – вакуумная камера; 2 – электрод; 3 – шлаковая ванна; 4 – металлическая ванна; 5 – электромагнитная система; 6 – слиток; 7 – кристаллизатор

дическое изменение полярности тока в соленоиде с частотой 0,07...0,017 Гц [17].

В целом эффективность применения электромагнитного перемешивания при ВДП определяется в каждом отдельном случае для конкретного сплава и типоразмера выплавляемого слитка.

Электрошлаковый переплав (ЭШП). ЭШП является благоприятным металлургическим процессом с точки зрения электромагнитного управления [33, 34]. Прежде всего это связано с тем, что при ЭШП через расплавы шлаковой и металлической ванн протекает рабочий ток значительного уровня (десятки килоампер), что позволяет использовать его для электромагнитного управления. Важно и то, что электрошлаковый процесс характеризуется широким диапазоном режимов его устойчивого протекания.

Основными задачами электромагнитного воздействия при ЭШП является повышение химической однородности выплавляемого металла и улучшение кристаллической структуры слитка. Кроме того, магнитные поля позволяют воздействовать на особенности плавления расходуемого электрода, характер образования и отрыва капель электродного металла, траектории их движения в шлаковой ванне и тем самым добиваться требуемых технологических и металлургических эффектов [34].

Принцип электромагнитного воздействия при ЭШП состоит во взаимодействии созданного специальным устройством внешнего магнитного поля с электрическим током плавки, в результате чего в расплавах формируются объемные электромагнит-

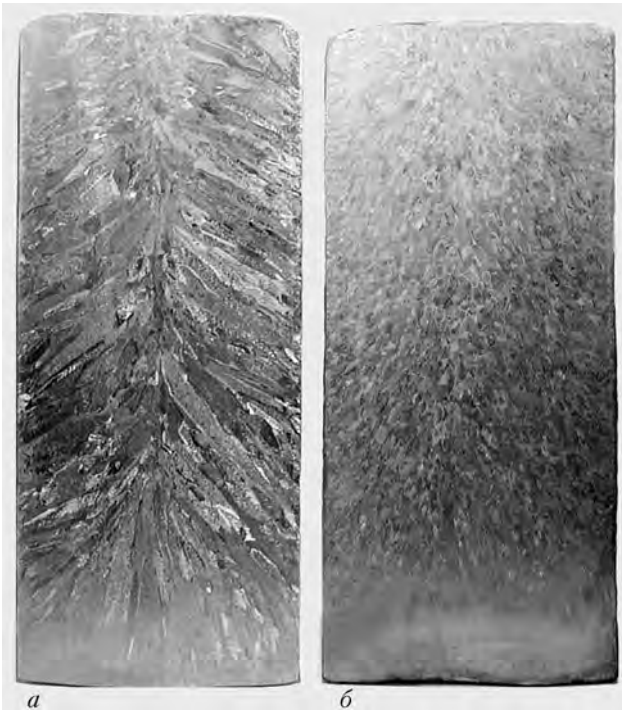


Рис. 16. Макроструктуры титановых слитков ЭШП, выплавленных без электромагнитного воздействия (а) и с ним (б)

ные силы, приводящие к силовому воздействию на расплав. В зависимости от характеристик внешнего магнитного поля в расплавах шлаковой и металлической ванн можно создавать электровихревые течения или вибрацию расплава.

Уже в первых работах по ЭШП с наложением магнитных полей отмечали измельчение кристаллической структуры слитка, сокращение расхода электроэнергии и длительности плавки [35, 36]. Затем было обнаружено, что стационарное вращение расплава вокруг оси ванны, вызванное наложением продольного и радиального магнитных полей, может вызывать негативные эффекты — увеличение глубины металлической ванны и нежелательное изменение ее формы [37].

В работах [34, 38, 39] исследовано влияние внешних магнитных полей на технологические и металлургические особенности ЭШП титановых сплавов. На основе проведенных исследований разработана технология магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов (рис. 15).

Показано, что эффективной схемой электромагнитного воздействия при МЭП является импульсное воздействие на металлургическую ванну продольным магнитным полем. В этом случае магнитное поле взаимодействует с радиальной составляющей тока плавки. Такая схема позволяет реализовать в ванне как электровихревые течения, так и вибрацию расплава. При этом обеспечивается интенсивное перемешивание жидкого металла и измельчение кристаллической структуры слитка (рис. 16). Формирование однородной мелкозернистой структуры обеспечивает высокую технологичность металла на стадии деформации и последующих переде-

лов, высокие значения его механических характеристик и работоспособность.

Заключение

МГД технологии находят все более широкое практическое применение в различных металлургических процессах. Помимо решения технологических задач по транспортировке и дозированию расплавов металла и шлака, воздействие внешними магнитными полями широко используют для интенсификации тепло- и массопереноса в плавильных агрегатах и управления процессом кристаллизации металла. Применение МГД эффектов в металлургии нацелено на улучшение свойств получаемых металлов и сплавов, снижение их стоимости, получение новых свойств и материалов.

1. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. — М.: Металлургия, 1975. — 288 с.
2. Повх И. Л., Капустя А. Б., Чекин Б. В. Магнитная гидродинамика в металлургии. — М.: Металлургия, 1974. — 240 с.
3. Верте Л. А. МГД-технологии в производстве черных металлов. — М.: Металлургия, 1990. — 120 с.
4. Повх И., Баринберг А., Баринберг В. Профессии магнитной гидродинамики // Наука и жизнь. — 1977. — № 6. — С. 40–46.
5. Дубоделов В. И. Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики // Процессы литья. — 1998. — № 3. — С. 36–43.
6. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Подишук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. — Киев: Наук. думка, 1989. — 256 с.
7. <http://www.niikhemz.com.ua/24.htm>.
8. Barglik J., Smagor A. Some aspects of electromagnetic stirring during process of continual steel casting // Proc. of the 6th Intern. conf. on Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 684–687.
9. MULTIMAG — A MULTIpurpose MAGnetic field system for EMP / A. Cramer, J. Pal, Th. Gundrum, G. Gerdeh // Ibid. — Dresden, 2009. — P. 826–829.
10. <http://www.icmm.ru/~lab4/download/mhdadvert.htm>.
11. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали / И. Н. Шифрин, В. Г. Грачев, В. И. Плантус и др. // Сталь. — 2005. — № 1. — С. 17–20.
12. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1992. — 336 с.
13. Thomas B., Chaudhary R. State of Art in Electromagnetic Flow Control in Continuous Casting of Steel Slabs // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 9–14.
14. <http://www.vniimetmash.ru/products/mnlz/mnlz.shtml>.
15. Kollberg S. Continuis Cast Proc. 4 th Intern. Iron and steel Congr. (London, 12–14 May, 1982). — London, 1982. — B5/1–B5/4.
16. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева / Под ред. А. Д. Свенчанского. — М.: Энергоиздат, 1981. — 296 с.
17. Тур Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. — М.: Металлургия, 1975. — 224 с.
18. Бабышкин Г. А., Деревянных А. А., Лазарев В. А. Камерные электропечи-миксеры для алюминиевой промышленности // www.therm.ru/60/files/60-11.htm.
19. <http://www.npcmgd.ru/> (ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики»).
20. Борисов В. Г. Управление структурой алюминиевых заготовок при непрерывном литье с МГД перемешиванием расплава // Металлургия машиностроения. — 2009. — № 3. — С. 39–44.
21. Kim M., Kim J., Park J. Designing of Continuous Casting Machine for Near Net Shape Aluminium // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic processing of materials



- EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 323–325.
22. Мочалов П. П., Гецелев З. Н. Непрерывное литье с формированием слитка электромагнитным полем // Цв. металлы. — 1970. — № 8. — С. 62–63.
 23. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. A. Magnetic Levitation of Large Liquid Volume // Proc. of the 6th Intern. Scientific Colloquium «Modelling for Material Processing» (Riga, Sept. 16–17, 2010). — Riga, 2010. — P. 15–20.
 24. Okumura T., Yamamoto K., Shibata M. Large Scale Cold Crucible Levitation Melting Furnace with Bottom Taping Nozzle // Proc. of the 6th Intern. conf. Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2009. — P. 521–524.
 25. Electromagnetic separation of inclusions from molten copper by alternating electromagnetic field // M. Higuchi, H. Ambai, S. Shimasaki at al. // Proc. of the 6th Intern. conf. on Electromagnetic proc. of materials EMP 2009 (Oct. 19–23, 2009, Dresden, Germany). — Dresden, 2010. — P. 86–89.
 26. Taniguchi S., Yoshikawa N., Takahashi K. Application of EMP to the separation of inclusion particles from liquid metal // Proc. of the Joint 15th Riga and 6th PAMIR Intern. conf. «Fundamental and Applied MHD» (Riga, June 27–July 1, 2005). — Riga, 2005. — P. 55–63.
 27. Электровихревые течения // В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг. — Рига: Зинатне, 1985. — 315 с.
 28. Ладохин С. В., Чернявский В. Б., Гладков А. С. Экспериментальное исследование распределения электромагнитных полей в кристаллизаторе для получения слитков в электронно-лучевых установках // Процессы литья. — 2006. — № 1. — С. 17–22.
 29. Панасюк Л. С., Ульянов В. Л., Явич В. Е. Электромагнитное перемешивание жидкого металла при электронно-лучевой плавке // Литье тугоплавких металлов. — Киев: ИПЛ АН УССР, 1970. — Вып 1. — С. 76–87.
 30. Чернявский В. Б., Ладохин С. В., Гладков А. С. Плавающие тигли и кристаллизаторы с системами электромагнитного перемешивания для электронно-лучевой плавки металлов и сплавов // Процессы литья. — 2005. — № 1. — С. 48–55.
 31. Effect of electromagnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting // P. Chapelle, A. Jardy, J. Bellot, M. Minvielle. // J. of Materials Science. — 2008. — V. 43. — P. 5734–5746.
 32. Effects of VAR Processing Parameters on Solidification Behavior of Ti–10V–2Fe–3Al Alloy Ingot // Yang Zhijun, Kou Hongchao, Chang Hui at al. // Special Casting & Nonferrous Alloys. — 2010. — № 4. — P. 295–297.
 33. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
 34. Протокопилов І. В. Магнітокерована електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис... канд. техн. наук / НАН України; Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 178 с.
 35. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванны при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка. — 1960. — № 9. — С. 12–16.
 36. Троичун І. П., Черныш В. П. Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // Свароч. пр-во. — 1965. — № 11. — С. 3–5.
 37. Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Ус, С. В. Томиленко // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 4. — С. 3–7.
 38. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокопилов І. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
 39. Компан Я. Ю., Протокопилов І. В., Назарчук А. Т. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей // Материалы между. конф. «Ti-2008 в СНГ» (18–21 мая 2008, С.-Петербург). — СПб, 2008. — С. 96–99.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 12.07.2011

Новости металлургии Украины

Одним из крупнейших предприятий Украины по производству стали, чугуна и проката является ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Петровского». Ежегодно завод производит 1,23 млн т стали и 1,8 млн т чугуна. По результатам 2007 года ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» понёс убытки с размере 14 млн грн.

В связи с убыточностью производства кислородно-конвертерный цех перевели на дуплекс-процесс, который предусматривает значительно большее количество операций, по сравнению с прежними технологиями. Но с другой стороны, дуплекс-процесс позволяет существенно снизить расход чугуна в процессе получения стали, а также в два раза сократить расход извести. Срок эксплуатации футеровки увеличивается при использовании методики дуплекс-процесса до 300 плавов.

Применение новой технологии требует увеличения расхода металлолома от 199 до 270 кг на тонну стали, но при этом в переработку идет металлолом более низкого качества.

Основным стимулом для перехода предприятия на технологию дуплекс-процесса является снижение затрат на производство стали. Использование методики дуплекс-процесса позволяет производить сталь последовательно в двух сталеплавильных агрегатах.

<http://www.kanwest-met.ru/>

