

**В. И. Дубоделов, А. Н. Смирнов, М. С. Горюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **Развитие фундаментальных исследований и прикладных разработок в области электромагнитной обработки металлов и сплавов\***

*Рассмотрены новые теоретические, лабораторные и промышленные исследования систем электромагнитных воздействий в металлургии. Показано, что использованию электромагнитных воздействий на материалы уделяется большое внимание, в том числе затвердеванию, росту кристаллов и разливки в условиях наложения электромагнитных полей. Достигнутый прогресс в представленных исследованиях во многом базируется на совершенствовании лабораторной базы и методов математического моделирования.*

**Ключевые слова:** электромагнитное перемешивание, затвердевание, плазменный подогрев, промежуточный ковш, непрерывная разливка стали

12-16 октября 2015 г. в г. Канны (Франция) состоялась 8-я Международная конференция по электромагнитной обработке материалов (8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM-2015). Всего в конференции приняли участие около 170 учёных, исследователей и инженеров из 20 стран мира. Наиболее многочисленными были делегации Франции, Германии и КНР.

На конференции было представлено 236 докладов, в том числе 10 пленарных (1-й день конференции), 133 секционных и 93 стендовых. Примечательно, что доклады были представлены как исследовательскими центрами и университетами, так и представителями промышленных предприятий.

Основные научные секции, по которым проводилась конференция:

- затвердевание, рост кристаллов и разливка в условиях наложения электромагнитных полей;
- фундаментальные основы электромагнитных и магнитогидродинамических (МГД) воздействий, теория и моделирование;
- измерительная техника;
- электромагнитное расплавление и перемешивание металла (холодный тигель, вакуумно-индукционный переплав, вакуумно-дуговой переплав, введение добавок, дополнительное перемешивание, торможение, вибрация);
- обработка жидких металлов: сталь, алюминий, титан, медь, магний;
- обработка современных материалов в постоянном и переменном магнитном полях;
- измерительная техника для оценки характеристик жидкометаллических потоков и неразрушающие методы контроля;
- индукционный нагрев, обработка плазмой и сопряжённые процессы термообработки;
- оборудование для электромагнитной обработки материалов, насосы, устройства для торможения, перемешиватели, силовые источники и пр.

Рассматривая весь спектр докладов, представленных на конференции, можно условно разделить их на информационно-презентационные, посвящённые исследованиям и разработкам ведущих научно-исследовательских центров и фирм-производителей оборудования; аналитические, связанные с проблематикой развития научных представлений об электромагнитных воздействиях на металлы и сплавы; научно-теоретические, в основе которых лежат аналитические исследования на физических и математических моделях, позволяющие расширить существующие представления о процессах обработки жидких и затвердевающих металлов и сплавов наложением электромагнитных полей; научно-прикладные, направленные на изучение вполне конкретных явлений и механизмов, которые обеспечивают улучшение условий литья и кристаллизации литых заготовок, повышение качества металлоизделий и т. д.

Примерно треть докладов в большей или меньшей степени была посвящена исследованиям возможностей применения электромагнитных воздействий и технических решений для управления процессами непрерывной разливки стали и цветных сплавов. Сравнивая с предыдущими конференциями EPM, следует отметить смещение акцентов в исследованиях на процессы, происходящие в кристаллизаторе МНЛЗ, а также в промежуточном ковше. Проблематика воздействия на формирование непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения практически не фигурировала в докладах. Также обратил внимание на себя тот факт, что в конференции практически не брали участия представители ведущих фирм-производителей электромагнитных устройств, используемых при непрерывной разливке стали. Исключение составляли фирмы ABB и Danieli.

Одной из наибольших по количеству докладов стала секция «Затвердевание, рост кристаллов и разливка в условиях наложения электромагнитных полей». Следует отметить, что при проведении этих

\* По материалам 8-ой Международной научно-технической конференции по электромагнитной обработке материалов «EPM-2015»

исследований обозначился существенный прогресс, основанный на применении методов прямых визуальных наблюдений за поведением кристаллов, что стало возможным благодаря рентгеноскопическим методам. Однако большая часть исследований была выполнена на легкоплавких модельных сплавах типа «индий-галлий-олово», «олово-свинец», «алюминий-кремний» и т. п. На наш взгляд, кинограммы и фотограммы, полученные на модельных сплавах, в целом весьма эффектны и информативны. Многим докладчикам удалось получить и зафиксировать новые явления и эффекты. Между тем, нельзя забывать о наличии существенных различий между характером затвердевания промышленных и модельных сплавов, что в значительной мере затрудняет перенос полученных результатов на реальные промышленные объекты. Видимо, в ближайшие годы выполняемые исследования будут распространены и на промышленные сплавы на основе железа, меди и алюминия.

В докладе, представленном южнокорейской фирмой POSCO, рассмотрены возможности повышения качества непрерывнолитых слябов за счёт электромагнитного перемешивания (ЭМП) в зоне вторичного охлаждения. POSCO разработала инновационную технологию подавления внутренних дефектов применительно к толстым слябам (система PosHARP), которая уже в течение нескольких лет используется в промышленных условиях. Примечательно, что оборудование для электромагнитного воздействия располагается внутри опорных роликов между 3-м и 6-м сегментами. Место приложения ЭМП, как было показано в докладе, и его интенсивность зависят от марки стали и скорости разливки.

В результатах, представленных в докладе китайских учёных из Университета Shenyang, рассмотрено влияние электромагнитного перемешивания на литую структуру стали с высоким содержанием углерода, отлитой при высокой скорости вытяжки. Показано, что влияние электромагнитного перемешивания проявляется, главным образом, в измельчении зёрен и распределении карбидов. С увеличением величины приложенного тока распределение карбидов становится более однородным. Применение при перемешивании вращающегося магнитного поля способствует образованию карбидов, разрушению карбидной сетки и уменьшению размеров карбидов. Установлено, что существуют оптимальные параметры электромагнитного перемешивания (прежде всего, величина силы тока в обмотках), которые могут повлиять на тип осаждённых карбидов. При использовании электромагнитного перемешивания образуются карбиды типа титана, а также измельчается микроструктура.

Не менее крупной оказалась секция «Фундаментальные основы электромагнитных пульсационных и магнитогидродинамических воздействий», в которой рассматривался широкий спектр исследований, посвящённых магнитно-структурным превращениям при затвердевании сплавов при различных электромагнитных воздействиях, в том числе пульсирующих и вращающихся электромагнитных полей. Обработку такими полями предлагается классифицировать

по типу магнитного поля: переменного или постоянного. Выбор электромагнитной обработки зависит от характера воздействия на обрабатываемый материал. Эти процессы могут использоваться для нагрева, плавления, перемешивания и транспортировки металла, а также контроля процесса затвердевания. Но для реализации каждого такого процесса требуются свои концептуальные подходы и специальное оборудование, параметры которого должны быть рассчитаны теоретически и оптимизированы в процессе дальнейшей эксплуатации. В отдельных докладах оценивалось влияние электромагнитных воздействий на поведение пузырьков газа (аргона) и неметаллических включений в расплаве. Значительное внимание уделено результатам исследований, полученным с применением численного моделирования.

В секции «Электромагнитное плавление и перемешивание металла» был представлен целый ряд докладов, имеющих теоретическое и прикладное значение. Во многих докладах детально рассматривались особенности электромагнитного торможения струй металла в кристаллизаторе МНЛЗ, а также изучались сопутствующие процессы в случае зарастания погружного стакана. Весьма представительными были доклады, посвящённые исследованиям вертикального электромагнитного тормоза (V-EMBr), который реализует несколько иные эффекты в сравнении с традиционным электромагнитным тормозом EMBr. В предлагаемой конструкции тормоза V-EMBr, используемой в МНЛЗ при литье слябов, имеются две пары магнитных полюсов, установленных вертикально на узких стенках кристаллизатора от мениска до места соударения струи, вытекающей из погружного стакана, со стенкой кристаллизатора. Важной особенностью тормоза V-EMBr является то, что он охватывает область жидкой ванны, начиная от мениска, и оказывает существенное воздействие на начальное формирование твёрдой корочки оболочки вблизи узких стенок кристаллизатора. Именно в этой области, как известно, происходят колебания поверхности металла, что приводит к захвату шлакообразующей смеси и образованию подповерхностных дефектов в виде газовых пузырьков и шлаковых включений.

Эксперименты, выполненные на физической модели (в качестве рабочей жидкости использовали ртуть) для слябового кристаллизатора, показывают, что эффект торможения в EMBr-Ruler достигается в управлении не только жидкометаллическими потоками, но и скоростью движения твёрдых частиц. Особенно хорошо это проявляется возле узких стенок, где поток разделяется на вертикально восходящий и вертикально нисходящий сегменты. Показано, что EMBr-Ruler обеспечивает устойчивое движение потоков и стабильность поведения поверхности жидкости в кристаллизаторе. Между тем вертикальная составляющая скорости потока вблизи узкой стенки может значительно повышаться (особенно при зарастании внутренней полости погружного стакана), что будет влиять на формирование твёрдой корочки и эрозию поверхности плит кристаллизатора.

В секции «Обработка жидких металлов: сталь, алюминий, титан, медь, магний» представлены

исследования по воздействию электромагнитного перемешивания на различные металлы и сплавы. Так фирмой АВВ были представлены оригинальные исследования по эффективности применения электромагнитного перемешивания в промежуточных ковшах двухручьевого слябовой и шестиручьевого сортовой МНЛЗ. Выполнен сравнительный анализ для двух различных конфигураций промковшей при наложении электромагнитного перемешивания и электромагнитного торможения. При электромагнитном перемешивании металл в промежуточном ковше достаточно хорошо гомогенизируется по температуре, а разность между температурами в различных зонах жидкой ванны уменьшается. Направленное перемешивание жидкой ванны в промежуточном ковше позволяет интенсифицировать процесс удаления неметаллических включений. Кроме того следует отметить, что использование электромагнитного перемешивания совместно с подогревом стали обеспечивает стабильность разлива в течение длительного периода времени. Эффект электромагнитного воздействия на струю металла, падающую из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш, требует дополнительных исследований в плане предотвращения образования вихревых зон и разбрызгивания стали, а также всплывания неметаллических включений.

В докладе, представленном фирмой Danieli, рассмотрены особенности перемешивания стали в кристаллизаторе тонкослябовой МНЛЗ. Показано, что при вытяжке заготовки со скоростью 5-6 м/мин традиционные приёмы электромагнитных воздействий для торможения потоков стали оказываются недостаточно эффективными в части предотвращения волновых процессов на поверхности металла в кристаллизаторе. В докладе представлена новая высокофункциональная система Multi-Mode®EMB. В экспериментальной части работы подтверждена целесообразность наложения электромагнитного поля с несколькими модами, но также показано, как можно выбрать настройки системы (ток катушки на разных полюсах) для различных параметров сляба (ширина, скорость вытяжки). Также рассмотрены факторы, влияющие на волнообразование на зеркале металла в кристаллизаторе, и получена большая база данных по скорости движения мениска. В целом предлагаемое устройство Multi-Mode®EMB обеспечивает поддержание скорости движения расплава в области мениска в диапазоне от 0,1 до 0,3 м/с и позволяет уменьшить волновые колебания мениска менее 0,8 мм для кристаллизатора, работающего в диапазоне скорости разлива 4-10 м/мин и ширине сляба 900-1800 мм.

По мнению учёных Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Дрезден, Германия), для повышения эффективности наложения электромагнитных полей в промышленных условиях необходимо расширение лабораторных исследований. Для этих целей построены три экспериментальные установки, обеспечивающие моделирование основных особенностей движения потоков при непрерывной разливке стали. Моделирование охватывает области течения стали и направление потоков в промежуточном ковше, внутренней полости погружного стакана, жидкой ванне

кристаллизатора, а также позволяет имитировать вдувание аргона в кристаллизатор. Эти процессы совмещаются с наложением электромагнитных воздействий на расплав в кристаллизаторе. Полученные результаты измерений параметров движения жидкого металла представляются важными в части проверки и корректировки численных моделей. При этом численные модели дают возможность изучить параметры движения потоков в деталях. Было показано, что численные данные находятся в очень хорошем соответствии с экспериментальными результатами. В дальнейшем исследования будут развиваться в направлении изучения многофазных потоков. Таким образом, в докладе убедительно показано преимущество комбинированного подхода, включающего экспериментальные и численные исследования.

В секции «Обработка современных материалов в постоянном и переменном магнитном поле» основное количество докладов было посвящено прямым исследованиям и измерениям, поскольку данные о различного рода прямых исследованиях и наблюдениях поведения различных сплавов по-прежнему достаточно скудны. Следует отметить такие исследования: оценка направленного затвердевания металлических сплавов в импульсном поперечном электромагнитном поле; определение степени влияния постоянного тока на эффект старения промышленных Cu-Cr-Zr сплавов; оценка влияния разницы магнитной восприимчивости коагулированных частиц на выравнивание размеров затвердевающих кристаллов; определение зависимостей по влиянию интенсивности магнитного поля на диффузию углерода в низкоуглеродистых сталях; оценка влияния постоянного магнитного поля на поведение оксидов марганца в гидротермальных процессах, а переменного магнитного поля – на микроструктуру и развитие текстуры в холоднокатаной чистой меди при отжиге и пр.

В секции «Измерительная техника для оценки жидких потоков металла и неразрушающие методы контроля» рассматривались различные аспекты измерений с помощью электромагнитных полей. Мониторинг движения потоков жидкой стали представляется весьма важным для повышения эффективности процесса литья и качества заготовки. При этом наиболее важной областью является жидкая фаза заготовки в кристаллизаторе, поскольку неблагоприятное развитие конвективных потоков приводит к вовлечению в металл частиц шлака, что вызывает образование поверхностных дефектов. Для того чтобы контролировать движение потоков в кристаллизаторе, применяют электромагнитные тормоза (EMBr) и специальные электромагнитные перемешиватели. Однако на практике использование этих электромагнитных устройств не всегда обеспечивает достаточный положительный эффект в силу отсутствия возможности измерения расхода металла в различных областях жидкой ванны. Одним из возможных методов измерения интенсивности движения потоков является способ бесконтактной магнитной томографии (CIFT), который обеспечивает получение, по меньшей мере, приблизительной картины потока,

используя первичные магнитные поля в расплаве посредством измерения потока индуцированного магнитного поля. Эти измерения используются для определения поля потока путем решения обратной линейной задачи. Для того, чтобы подтвердить применимость CIFT для непрерывной разливки, была исследована система измерения для модели в масштабе 1:10 (mini-LIMMCAST) для непрерывной разливки слябов. В ряде экспериментов с помощью CIFT-реконструкции для сплава системы Ga-In-Sn была подтверждена эффективность рассматриваемой системы.

В докладе, посвящённом применению вращающегося электромагнитного поля для обработки круглой непрерывнолитой заготовки, рассмотрены результаты лабораторных исследований (масштаб модели 1:3). Измерительная техника позволяла обнаруживать движение горизонтальных потоков, которые являются результирующими радиальной и тангенциальной составляющих скорости. Показано, что тангенциальная составляющая скорости при наложении вращающегося магнитного поля (RMF) без наличия падающей струи зависит от радиуса заготовки и положения вертикальной плоскости. При этом система потоков в кристаллизаторе состоит из первичного закрученного потока и меридионального вторичного потока, который состоит из двух тороидальных вихрей, расположенных друг над другом. Этот вторичный поток отвечает за перераспределение момента импульса внутри кристаллизатора. Измерение тангенциальной составляющей скорости при наложении вращающегося магнитного поля (RMF) показало, что максимальная скорость вращения достигается в области расположения электромагнитного перемешивателя и непрерывно уменьшается при увеличении расстояния до него. Более того, величина тангенциальной скорости несущественно различается по высоте кристаллизатора. Интересно, что тангенциальная скорость вне зоны, охватываемой перемешивателем, даже несколько выше, чем в области прямого действия магнитного поля.

Для обнаружения несбалансированных конвективных потоков в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ японскими учёными из компании Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation предложен электромагнитный датчик, который устанавливается под кристаллизатором со стороны узких граней. Выполненные предварительные исследования и лабораторные эксперименты позволили установить взаимосвязь между температурой поверхности сляба и ЭДС переменного тока, возникающей при наложении магнитного поля на поверхность сляба. Кроме того в ходе заводских испытаний при установке датчика чуть ниже кристаллизатора на узкой грани заготовки показано, что предлагаемый датчик позволяет измерять температуру поверхности сляба в тяжёлых условиях работы и обнаруживать несбалансированные потоки стали в кристаллизаторе.

Среди других докладов этой секции были представлены результаты разработок новых принципов измерений на основе магнитной индукции, позволяющих фиксировать различные параметры, в том

числе перемещение в расплаве неметаллических частиц и пузырьков газа.

В секции «Индукционный нагрев, обработка плазмой и сопряжённые процессы термообработки» представлен целый ряд докладов, иллюстрирующих эффективность этих методов нагрева. Между тем, по мнению ряда докладчиков, плазменный подогрев имеет определённые преимущества перед индукционным нагревом в части минимизации затрат на обслуживание и меньшего воздействия на окружающую конструкцию. Применение плазменного подогрева рассмотрено для промежуточного ковша МНЛЗ вместимостью 30 тонн стали. Показано, что применение плазменного подогрева обеспечивает эффективный нагрев металла в нагревательной камере. Это относится, прежде всего, к верхней ее части. Для распределения подогретого металла в жидкой ванне промежуточного ковша предложено использовать электромагнитное перемешивание, оптимизация параметров которого выполнена с помощью численного моделирования. Применение электромагнитного перемешивания имеет следующие преимущества: высокая надёжность оборудования в силу отсутствия контакта его частей с жидким металлом и возможности работать автономно; обеспечение управления направлением и скоростью движения потоков в нагревательной камере и промежуточном ковше в целом, что позволяет иметь оптимальную структуру потоков независимо от температуры расплава или степени эрозии огнеупорных перегородок.

В секции «Оборудование для электромагнитной обработки материалов, насосы, устройства для торможения, перемешиватели, силовые источники и пр.» рассмотрены различные теоретические и технические аспекты создания нового и модернизации существующего в эксплуатации оборудования, использующего электромагнитные поля. Так, для высокоэффективной разливки стали на МНЛЗ предложено новое сочетание МГД-технологий и оригинальных электромагнитных устройств (разработка ФТИМС НАН Украины). Показано, что дальнейший прогресс может быть обеспечен за счёт широкого использования инновационных решений, которые, в частности, базируются на применении в МНЛЗ совмещённых электромагнитных полей для воздействия на металл в промежуточном ковше, кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО) заготовки. Однако такой комплексный подход обуславливает уточнение требований как к рабочим параметрам, так и режимам функционирования МГД устройств и их взаимодействию в процессе разливки и формирования заготовки. Для управления процессами перемешивания и рафинирования жидкой стали, а также быстрой корректировки её температуры и расхода при малонапорном переливе в кристаллизатор разработан оригинальный магнитодинамический промежуточный ковш (МД-ПК). Последующая модернизация такого агрегата позволила кардинально повысить его тепловые и гидродинамические характеристики.

Выполненное физическое и математическое моделирование процесса малонапорной разливки стали из МД-ПК показало, что, в сравнении с

традиционной технологией, уменьшение металлотатического напора в 3,0-3,5 раза приводит к уменьшению в 1,7-1,8 раза глубины проникновения высокоскоростной струи расплава в тело кристаллизующейся заготовки. Данные моделирования и прямых измерений электрических характеристик МД-ПК свидетельствуют, что он способен сформировать плоский направленный поток расплава шириной 0,5-0,8 м. Совокупность рассмотренных особенностей работы МД-ПК в корне меняет условия формирования заготовки, несколько повышая тепловую нагрузку на кристаллизатор, но при этом уменьшая её в зоне вторичного охлаждения, а также позволяет исключить применение дорогостоящих систем электромагнитного торможения расплава в кристаллизаторе и создать предпосылки для уменьшения технологической длины МНЛЗ.

В последнее время требования к качеству отливок из алюминиевых сплавов постоянно ужесточаются, что выражается в необходимости обеспечения высокой чистоты сплавов и изделий из них от газов, неметаллических включений, устранения литейных дефектов, максимального приближения получаемой отливки к геометрии конечного изделия, улучшения качества литья (повышение комплекса физических, механических, технологических, эксплуатационных и специальных свойств), автоматизации процесса при одновременном повышении его производительности и экологической безопасности и пр. Сотрудниками ФТИМС НАН Украины разработан многофункциональный литейный МГД комплекс для изготовления высококачественного алюминиевого литья, который способен эффективно работать в различных существующих литейных технологиях. Его основным элементом является магнитодинамический миксер-дозатор с повышенными рабочими характеристиками и расширенными благодаря этому функциональными возможностями. В одном таком агрегате обеспечивается подогрев и стабилизация температуры сплавов, достигается высокая однородность химсостава, проводится внепечная обработка, способствующая глубокому рафинированию металла от водорода и неметаллических включений, а после этого осуществляется дозированная электромагнитная разливка с высокой точностью (погрешность дозирования – не более 1-2 % от массы дозы).

Весьма перспективной представляется разработка комбинированного электромагнитного перемешивателя жидкого металла, создающего бегущее и пульсирующее магнитные поля при его соответственно многофазном и однофазном электропитании (совместная разработка ФТИМС и ИЭД НАН Украины). Применительно к отражательной печи для алюминия проведено компьютерное 3D-моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов для различных конструктивных вариантов комбинированного перемешивателя в виде индукторов с двух- и трёхстержневым магнитопроводом. Показано, что периодическое чередование бегущего и пульсирующего магнитных полей позволяет поочередно создавать одноконтурное и двухконтурное вихревое движение металла, тем самым более качественно перемешивать

расплав во всех зонах объёма ванны печи. Застойные зоны, которые возникают при одном режиме работы, эффективно перемешиваются при другом.

В качестве новой концепции совершенствования принципа создания электромагнитной силы в магнитодинамической установке конструкции ФТИМС НАН Украины предложено создание условий суперпозиции пульсирующих вертикально направленных электромагнитных сил, создаваемых однофазными или двухфазными переменными токами (I) и магнитными полями (B), имеющими сдвиг по фазе относительно друг друга  $\psi_{phase} = 2\pi/3$ . Результирующая суперпозиция как минимум трёх вертикально однонаправленных переменных пульсирующих электромагнитных сил обеспечивает утроенную постоянную составляющую, создающую давление и минимальную вибрационную составляющую. На этой основе разработана конструкция современной магнитодинамической литейной установки со встроенным индукционным каналом и тремя отдельными системами индуцирования токов в каждом из трёх каналов и трёхполюсным трёхфазным электромагнитом, реализующая принцип суперпозиции трёх составляющих электромагнитных сил в встроенной тройниковой рабочей зоне.

## Заключение

В целом Международная конференция «ЕPM-2015» показала, что в настоящее время электромагнитная обработка материалов – это хорошо изученные и зрелые в технологическом плане процессы. Накопленные в этой области теоретические и практические знания позволяют улучшить многие технологические системы в материаловедческих, металлургических и литейных процессах и интегрировать их в промышленных масштабах для конкретного приложения (производство высококачественных и уникальных конструкционных и функциональных материалов и литых изделий из них для высокотехнологичных отраслей промышленности).

Для электромагнитной обработки металлов и сплавов могут эффективно использоваться как постоянные, так и переменные поля и соответственно токи. Выбор типа тока зависит от желаемого эффекта воздействия на обрабатываемые материалы. В целом процессы электромагнитных воздействий представляются вполне эффективными для нагревания, плавления металлов и сплавов, формирования принудительных потоков в жидкой ванне, осуществления процессов внепечной обработки, легирования, модифицирования и затвердевания сплавов, управления процессами непрерывной или дозированной разливки металла в технологические металлоприёмники и т. д. Однако для каждого такого процесса требуется определённая совокупность технических решений и оптимальная конфигурация оборудования.

Благодаря мультидисциплинарным подходам, в которых сочетается гидродинамика, теплообмен, металлургические процессы, затвердевание, всплытие неметаллических включений и т. п., можно представить, каким образом следует создавать инновационные процессы с интеграцией в них новых

эффективных электромагнитных систем и оборудования. Сочетание более сложных конфигураций электромагнитных систем может быть достигнуто комбинацией различных полей и их интенсивности.

Можно утверждать, что будущее развитие технологий электромагнитных воздействий находится преимущественно в плоскости требований повышения качества металлопродукции, ресурсосбережения и сокращения вредного воздействия на

окружающую среду. В металлургической промышленности внедрение электромагнитных технологий, видимо, будет связано с повышением производительности отдельных агрегатов (например, МНЛЗ), ужесточением требований к качеству заготовки, повышением уровня автоматизации и техники безопасности. На основе таких подходов будет создаваться новое поколение МГД-технологий и оборудования.

### Анотація

*Дубодєлов В. І., Смірнов А. Н., Горюк М. С.*

Розвиток фундаментальних досліджень прикладних розробок в галузі електромагнітної обробки металів та сплавів

*Розглянуто нові теоретичні, лабораторні та промислові дослідження систем електромагнітних впливів в металургії. Показано, що використанню електромагнітних впливів на матеріали приділяють велику увагу, у тому числі твердінню, росту кристалів і розливці в умовах накладання електромагнітних полів. Досягнутий прогрес в представлених дослідженнях базується багато чому на удосконаленні лабораторної бази і методів математичного моделювання.*

### Ключові слова

*електромагнітне перемішування, твердіння, плазмовий підігрів, проміжний ківш, неперервна розливка сталі*

### Summary

*Dubodelov V., Smirnov A., Goryuk M.*

Evolution of fundamental researches for applied developments in field of metals and alloys electromagnetic treatment

*The new theoretical and laboratory researches and industrial investigations for systems of electromagnetic treatment influences in the metallurgy are considered. It is shown that the application of electromagnetic effects on the materials obtains much attention, including solidification processes, crystal growth and casting under the superposition of electromagnetic fields. The achieve progress in submitted studies is based on the new laboratory facilities and the great improvement of methods of mathematical modeling.*

### Keywords

*electromagnetic stirring, solidification, plasma heating, tundish, continuous casting of steel*

Поступила 19.01.2015