
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 537.84:669:621.74

В. И. Дубоделов, д-р техн. наук, акад., зав. отделом,
e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

А. Н. Смирнов, д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр.,
e-mail: stalevoz@i.ua

А. П. Верзилов, канд. техн. наук, науч. сотр.,
e-mail: verzilovalex@gmail.com

Ю.Ю. Кулиш, инженер 1 кат., e-mail: deatherob@gmail.com

Д. И. Гойда, мл. науч. сотр., e-mail: goydadaniil@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Выполнен обзор современных методов электромагнитного воздействия на металл при непрерывной разливке стали. Показаны особенности использования электромагнитного воздействия в промежуточном ковше, кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения и финальной зоне затвердевания. Обозначены области применения таких электромагнитных систем для разливки различного сортамента сталей.

Ключевые слова: электромагнитные воздействия, магнитная гидродинамика (МГД), машина непрерывного литья заготовки (МНЛЗ), электромагнитное перемешивание, двухкамерные промежуточные ковши.

Как показывает многолетняя практика непрерывной разливки, качество заготовки определяется целым комплексом технологических мероприятий, среди которых рациональный выбор рабочих параметров литья, совокупность используемых огнеупорных изделий на участке «сталеразливочный ковш – кристаллизатор МНЛЗ», защита стали от вторичного окисления, температурный режим разливки и пр. В то же время, для подавления и предотвращения дефектов кристаллизационного, усадочного и ликвационного характера все большее распространение получают специальные технологические приемы, которые позволяют управлять качеством металла за счет регламентированного нагрева и принудительного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки посредством наложения различного рода электромагнитных сил [1–4, 22].

В общем случае наложение электромагнитного поля на жидкую сталь, которая находится в промежуточном ковше или представлена жидкой фазой в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и зумпфовой зоне МНЛЗ,

Кристаллизация и структурообразование сплавов

может обеспечивать принудительное перемещение потоков расплава в вертикальной или горизонтальной плоскости, а также их геликоидальное движение. При этом, вне зависимости от конструкции, устройства для электромагнитного перемешивания обеспечивают прямое воздействие на заготовку только на определенном достаточно коротком (несколько десятков сантиметров) участке. В то же время, оборудование для электромагнитного перемешивания металла может быть расположено практически на всем протяжении жидкой фазы на МНЛЗ от промежуточного ковша до зумпфовой зоны (рис. 1).

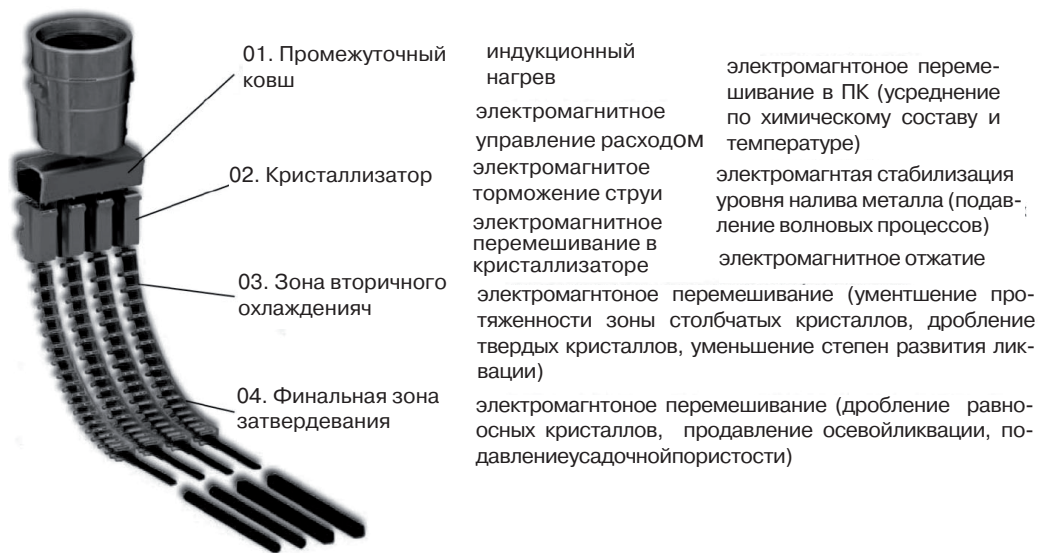


Рис. 1. Применение электромагнитных воздействий на различных стадиях процесса непрерывной разливки стали

При выборе режимов и характера приложения электромагнитного воздействия необходимо принимать во внимание тот факт, что при непрерывной разливке в достаточно широких пределах изменяется целый ряд параметров: химический состав стали, температура разливки (в том числе и температура перегрева над линией ликвидус), скорость разливки стали, сечение непрерывнолитой заготовки, режим качания кристаллизатора, способ подвода стали в кристаллизатор, режимы вторичного охлаждения, требования к кристаллической структуре и химической однородности и пр. Следовательно, оптимизация параметров электромагнитного перемешивания для определенных конкретных условий представляется сложной многофункциональной задачей, требующей проведения глубоких качественных исследований. Между тем, общие закономерности электромагнитного воздействия на формирование непрерывнолитой заготовки возможно проследить на основании современных понятий об условиях затвердевания при принудительном перемешивании жидкой фазы и обобщении многочисленных практических данных, представленных в литературе.

Для достижения максимального положительного эффекта при наложении электромагнитного воздействия необходимо ответить на определенную совокупность вопросов: какие энергетические показатели наиболее рациональны (или допустимы); предпочтительное движение принудительных конвективных потоков расплава (линейное или циркуляционное); какая предельная скорость движения потоков и на каких стадиях затвердевания допустима; место приложения (расположения) источника воздействия; какой объем расплава будет участвовать в перемешивании и каким образом это повлияет на всю систему; в какой степени требуется реконструкция существующего технологического оборудования при реализации предлагаемой схемы воздействия и пр.

Наиболее характерной особенностью распределения скоростей конвективных потоков при электромагнитном перемешивании является их максимальное значение непосредственно у источника воздействия с последующим уменьшением интенсивности по мере приближения к оси заготовки. Максимальная скорость принудительных потоков при электромагнитном перемешивании задается посредством изменения напряженности электромагнитного поля и может достигать значений нескольких метров в секунду. При этом в зависимости от условий воздействия в жидкой фазе могут формироваться как ламинарные течения, так и турбулентные потоки и вихревые зоны.

Как видно из рис. 1, применение электромагнитных сил на МНЛЗ начинается еще в промежуточном ковше, где среди основных операций можно выделить: индукционный нагрев; электромагнитное перемешивание с целью усреднения по химическому составу и температуре; электромагнитное управление расходом.

Индукционный нагрев стали позволяет достичь регламентированных показателей по температуре без существенного перегрева стали, которая выпускается из сталеплавильного агрегата. Широко известно, что электрический и термический коэффициент полезного действия индукционных канальных устройств – самый высокий среди электрических печей и миксеров. Кроме того, помимо нагрева, при индукционном способе передачи энергии, в обрабатываемом жидком металле возникают электромагнитные силы или потоки, приводящие расплав в движение [22].

В конструктивном плане основные технические решения, предлагаемые для индукционного подогрева стали в промежуточном ковше, базируются на создании двухкамерного промежуточного ковша. Причем нагрев стали осуществляется либо в приемной камере, либо при перетекании из одной камеры в другую.

Используя эти преимущества, были разработаны системы индукционного нагрева в канале для промежуточных ковшей сравнительно небольшой (обычно менее 30 т) вместимости. Эти нагревательные устройства достаточно компактны, чтобы быть встроенными в существующие промежуточные ковши без каких-либо существенных модификаций. Более того, такие нагревательные устройства практически не уменьшают полезный объем промежуточного ковша.

Технология индукционного нагрева в канале достаточно широко исследована и применяется японскими компаниями Kawasaki Steel Corporation, Nippon Steel, Daido Steel, Sumitomo Metal и др. Анализ известных результатов свидетельствует о том, что эффективность нагрева металла достаточно высока (примерно 90 % от подводимой энергии преобразуется в тепло, усваиваемое ванной) и обеспечивается хорошей управляемостью процессом. При этом около 5 % тепла теряется в электрической цепи, а еще 5 % – через огнеупорные стенки.

Однако, при очевидных преимуществах такого процесса он не лишен и существенного недостатка, который выражается в повышенном расходе электроэнергии на уровне до 15 кВт·ч/т стали, а также использовании дорогостоящего, сложного в эксплуатации и ремонте оборудования.

Для повышения эффективности удаления неметаллических включений японская компания JFE Steel разработала двухкамерный промежуточный ковш, в котором одна камера имеет цилиндрическую форму, что позволяет использовать электромагнитное поле для придания жидкой стали вращательного движения (рис. 2). Этот процесс получил название «промежуточный ковш с центробежным движением потоков» (CF Tundish).

Благодаря вращательному движению жидкой стали увеличивается резидентное время ее пребывания в промежуточном ковше и, соответственно, возрастет вероятность удаления крупных неметаллических включений в результате их всплытия в шлак. Обработанный таким образом расплав затем подается в разливочную камеру через канал, выполненный в придонной области промежуточного ковша.

Использование промежуточного ковша с вращательным движением потоков позволяет значительно уменьшить количество крупных оксидных включений

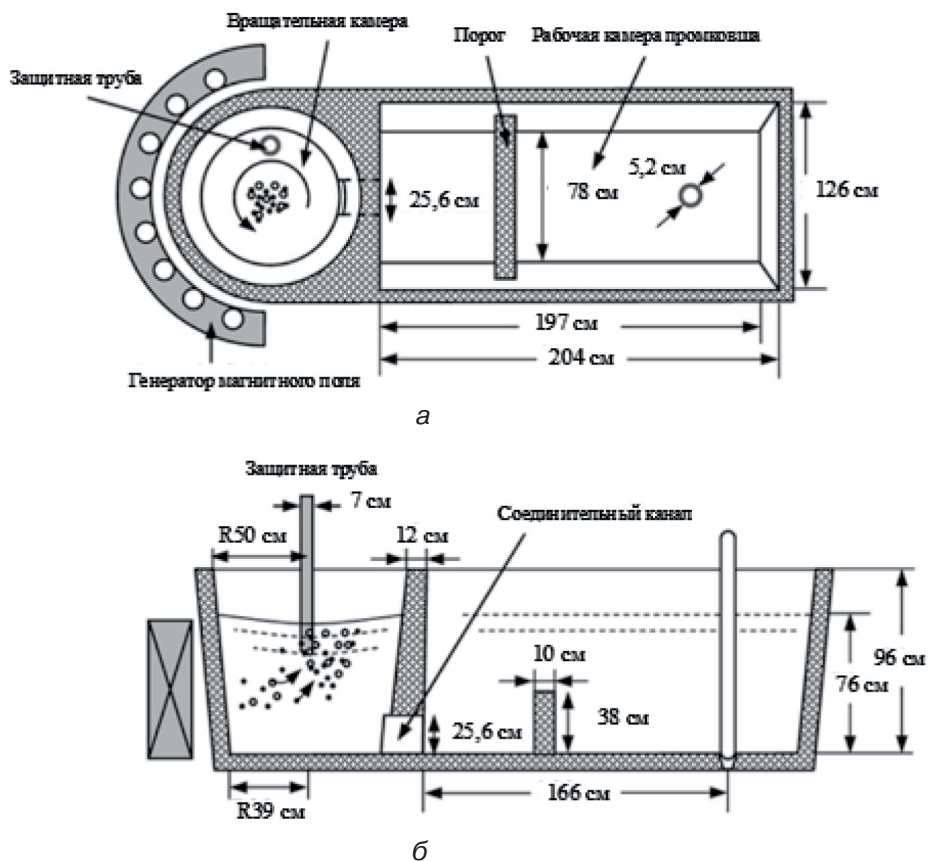


Рис. 2. Двухкамерный промежуточный ковш с электромагнитным перемешивателем для создания вращающегося магнитного поля: а – вид сверху; б – фронтальная плоскость (сечение)

(размером более 10 мкм) в готовой стали. В дальнейшем разработанный промежуточный ковш и технология подогрева стали электромагнитным полем была использована для производства нержавеющей стали высокого качества, раскисленной алюминием.

В целом, технология вращательного движения потоков и их индукционного подогрева в промежуточном ковше имеет определенные преимущества перед другими методами, заключающимися в обеспечении равномерности подогрева, высокой эффективности обработки в плане удаления неметаллических включений, надежности эксплуатации и простоте в обслуживании, а также позволяет адаптировать эту технологию в условия эксплуатируемых промежуточных ковшей и МНЛЗ. При этом систему индукционного подогрева с целью снижения энергозатрат наиболее целесообразно применять в конце разливки ковша в случае значительного падения температуры стали при ее переливе в кристаллизатор.

Стоит отметить, что в мировой практике известны опытные образцы, однако в условиях жесточайшей конкуренции и борьбы за себестоимость продукции они проигрывают традиционным методам дозирования.

На сегодняшний день разработан ряд электромагнитных устройств, применяемых для оказания воздействия на затвердевающую заготовку. При этом, мировыми лидерами в этом направлении являются компании ABB и JFE Steel [11]. На основании лабораторных исследований, промышленных испытаний

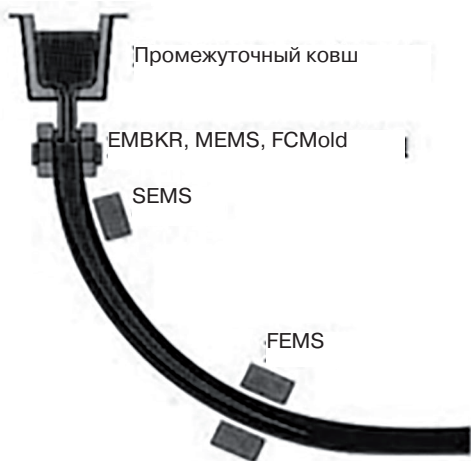


Рис. 3. Электромагнитные воздействия при формировании непрерывнолитой заготовки

такая система подавляет возмущения на мениске жидкого металла, которые в свою очередь могут приводить к неравномерному теплоотводу и поверхностным дефектам непрерывнолитого слитка.

Конструктивно EMBR является электромагнитной системой с несколькими полюсами с обмотками и применяется при литье слябов, а принцип ее действия основан на использовании эффекта Гартмана – изменения профиля скорости жидкого металла и подавления турбулентных пульсаций при наложении поперечного постоянного магнитного поля.

В то же время, для разливки тонких слябов компания POSCO разработала EMBR с изменяемой геометрией полюсов (рис. 4) в зависимости от конструкции кристаллизатора и сталеразливочного стакана [12].

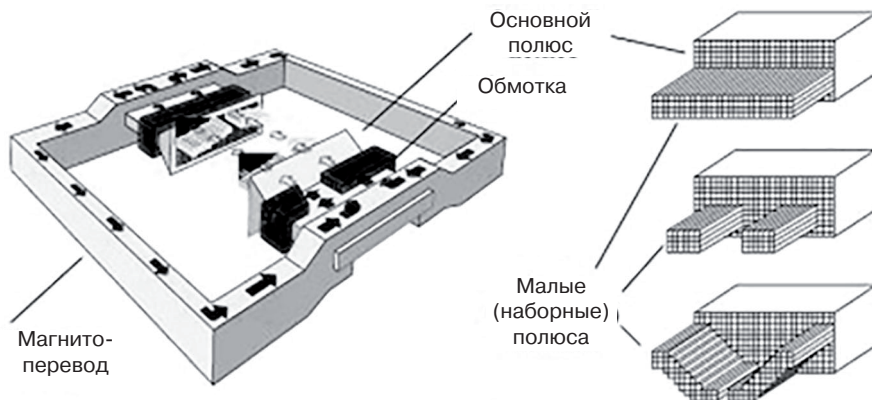


Рис. 4. EMBR с изменяемой геометрией полюсов для непрерывной разливки тонких слябов

Другим вариантом с точки зрения управления движением расплава в кристаллизаторе МНЛЗ является устройство FC Mold (Flow Control Mold), также применяющееся при литье слябов и использующее поперечное магнитное поле, создаваемое многополюсными системами (рис. 5).

FC Mold увеличивает степень снятия теплоты перегрева жидкой стали, способствует выравниванию температуры на мениске, препятствует увлечению неметаллических включений в тело заготовки.

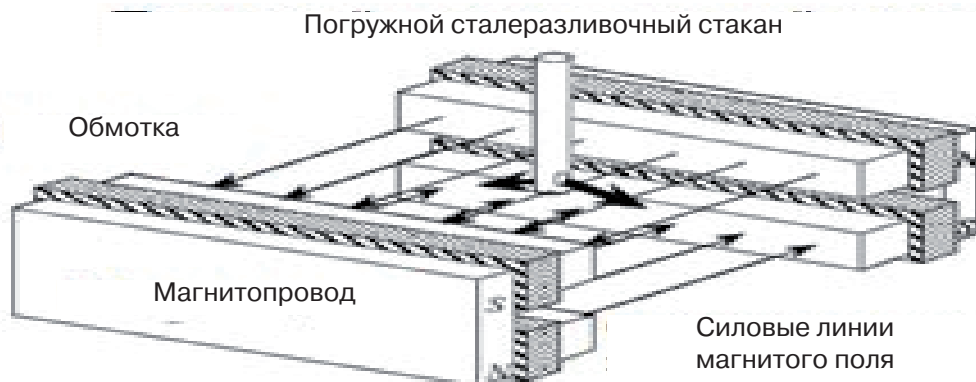


Рис. 5. Электромагнитное устройство FC Mold

Аналогичным FC Mold технологическим решением, которое применяется при разливке стали на сортовую заготовку, является использование электромагнитного перемешивателя MEMS (Mold Electromagnetic Stirrer).

С точки зрения отливки тонких слэбов компанией POSCO созданы специальные перемешиватели (рис. 6, 7). Один из них может перемещаться по высоте кристаллизатора (рис. 6) и обеспечивать различные режимы движения расплава на мениске и на уровне погружного сталеразливочного стакана. Другой перемешиватель создает сильное магнитное поле, используя явление сверхпроводимости (рис. 7) [13].

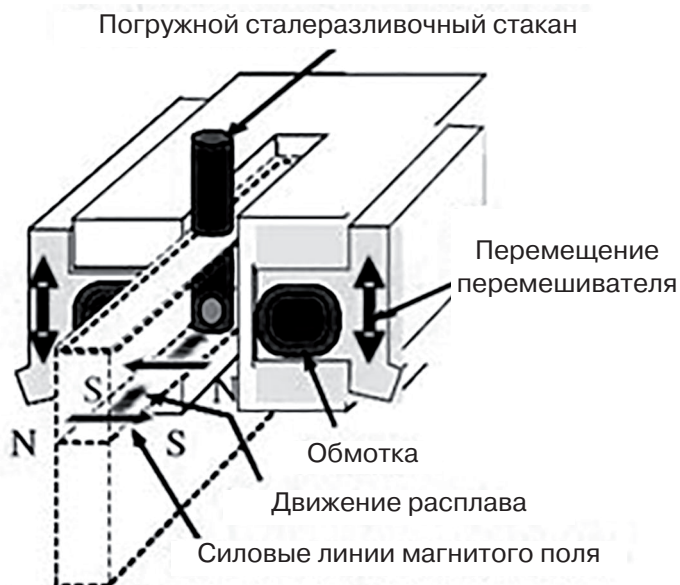


Рис. 6. Движущийся электромагнитный перемешиватель

Для упрощения эксплуатации оборудования все перечисленные устройства, как правило, конструктивно совмещаются с кристаллизатором МНЛЗ. Также при использовании нескольких высокочастотных обмоток имеет место дополнительное отжигание (как при плавке в холодном тигле) затвердевающей заготовки от стенок кристаллизатора, что улучшает качество поверхности слитка и долговечность кристаллизатора, однако несколько ухудшает условия охлаждения заготовки.

В свою очередь, наиболее существенными негативными проявлениями, сопровождающими наложение электромагнитного воздействия в кристаллизаторе,

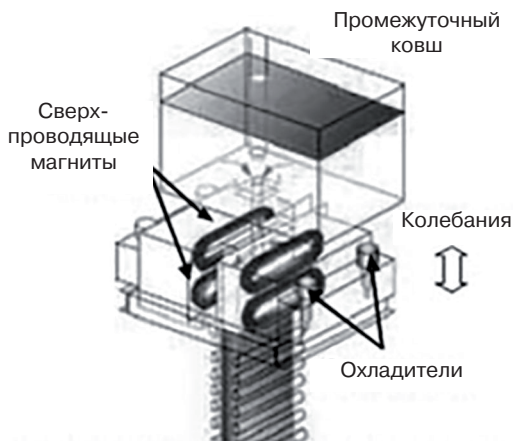


Рис. 7. Перемешиватель на сверхпроводящих магнитах

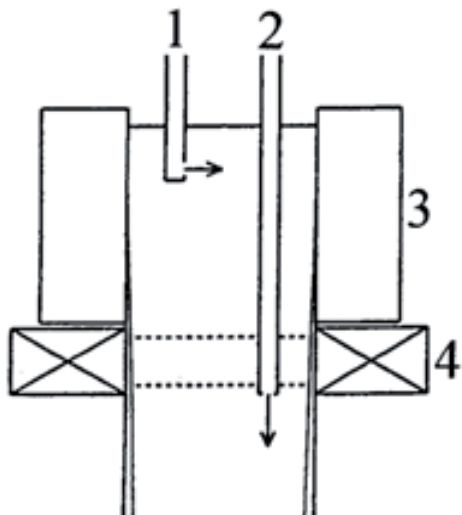


Рис. 8. Схема получения биметаллических слябов с применением электромагнитного воздействия: 1, 2 – подача различных металлов; 3 – кристаллизатор; 4 – электромагнитное устройство

наличие восходящих конвективных потоков обеспечивает определенное повышение чистоты металла в этой зоне.

Поскольку в зоне вторичного охлаждения толщина затвердевшей по периметру (в поперечном сечении) части слитка значительна и имеют место большие немагнитные зазоры, SEMS обычно запитывается током низкой частоты.

Можно с уверенностью утверждать, что наложение электромагнитного перемешивания в зоне формирования столбчатых кристаллов может препятствовать формированию различного рода перемычек между противоположными фронтами затвердевания, что, в конечном счете, обеспечит значительное подавление дефектов усадочного (пористость) и ликвационного характера. При электромагнитном перемешивании (особенно в турбулентном режиме) условия формирования дендритов могут существенно изменяться. Это в первую очередь будет относиться к тем дендритам, которые выступают за фронт затвердевания в жидкую фазу. Соответственно, при такой обработке линия фронта затвердевания будет

принято считать: образование полос отрицательной ликвации («белых» полос на серном отпечатке), которые уменьшают химическую однородность заготовки и могут приводить к повышенному образованию трещин при прокатке; увеличение износа погружных стаканов, находящихся в зоне влияния электромагнитного перемешивания [6].

Одним из уникальных способов применения электромагнитных воздействий в кристаллизаторе является метод непрерывной разливки на биметаллические слитки из различных марок стали (рис. 8). При этом, с применением такой технологии компания Nippon Steel Corp. изготавливает слябы, сердцевина которых сформирована из углеродистой стали, а наружный слой по периметру литой заготовки – из нержавеющей. Для реализации такого процесса зона смешения потоков различных марок стали размещена в постоянном поперечном магнитном поле. Вследствие эффекта Гартмана происходит подавление гидродинамических возмущений в этой области и предотвращается смешивание углеродистой и нержавеющей стали [23].

В зоне вторичного охлаждения может применяться электромагнитный перемешиватель SEMS (Strand Electromagnetic Stirrer), который создает бегущее или вращающееся магнитное поле и может применяться при получении как слябов, так и сортовых заготовок. Основной целью является обеспечение улучшения качества непрерывно литой заготовки в зоне столбчатых (дендритных) кристаллов за счет перемешивания жидкой сердцевины слитка и последующего их измельчения и уплотнения. Помимо этого,

выравниваться, а формирующаяся кристаллическая структура – уплотняться. Нельзя исключать также и высокую вероятность того, что под воздействием динамических нагрузок часть вершин дендритов будет попросту механически обрушаться и осколки твердой фазы попадут в жидкую ванну, где будут постепенно оседать в зумповую зону [7]. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов, в свою очередь, при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов [8].

Анализ результатов воздействия электромагнитного перемешивания в зоне роста столбчатых кристаллов показывает, что они во многом зависят от места приложения и интенсивности воздействия, содержания углерода в стали, степени перегрева стали, скорости движения и направленности принудительных конвективных потоков и пр. Так, измельчение столбчатых кристаллов при электромагнитном перемешивании достигается в достаточно широком диапазоне интенсивности воздействия (при создании вертикальных восходящих потоков). Однако, этот эффект сопровождается, как правило, образованием «белой» полосы (по серному отпечатку) ликвации, которая при увеличении интенсивности воздействия проявляется все более ярко. Учитывая тот факт, что в литературе отсутствуют серьезные практические доказательства отрицательного влияния таких «белых» ликвационных полос на качество непрерывнолитой заготовки, следует, видимо, признать высокую вероятность негативных проявлений (внутренние трещины) при прокатке такого металла. В ряде исследований приводятся рекомендации по ограничению значений энергетических параметров индуктора (например, силы тока) в зависимости от индекса проявления «белой» полосы. Однако, такие данные не могут носить универсального характера из-за различий в конструкции индуктора и в условиях разлива.

С другой стороны, эффект электромагнитного перемешивания оказывает влияние на формирование заготовки в достаточно малом (по сравнению с общим временем затвердевания) временном интервале. Поэтому при выходе из зоны действия электромагнитного перемешивания оказывается вполне вероятным восстановление нормальных закономерностей роста зоны столбчатых кристаллов, что снижает однородность кристаллической структуры и повышает вероятность появления трещин при прокатке.

Таким образом, наложение электромагнитного перемешивания в зоне роста столбчатых кристаллов может иметь как позитивные, так и негативные проявления. Интенсивность наложения воздействия во многом ограничивается процессом формирования «белых» ликвационных полос, которые снижают физическую и химическую однородность заготовки. При этом конечный результат обработки будет определяться рациональным выбором режимов и местом приложения воздействия с учетом конкретных условий разлива. Поэтому в зависимости от этих условий место приложения воздействия может варьироваться в значительных пределах, что также усложняет конструкцию устройства для расположения электромагнитного индуктора.

Помимо электромагнитного перемешивания в зоне вторичного охлаждения могут применяться устройства электромагнитного обжата заготовки. Такие устройства используются на нескольких заводах в КНР, однако широкого применения по всему миру они не получили в силу своей дороговизны.

В финальной зоне затвердевания заготовки (зумповая зона) может применяться электромагнитный перемешиватель FEMS (Final Electromagnetic Stirrer), который также является низкочастотным. Его задача – обеспечить воздействие на фронт кристаллизации заготовки, препятствовать росту столбчатых кристаллов в центральной части слитка и подавлять процессы ликвации и сегрегации. Однако, следует отметить, что единого мнения по поводу эффективности FEMS и целесообразности его применения до сих пор в среде разработчиков и потребителей нет, что объясняется трудностью определения места его установки на МНЛЗ и выбора рациональных режимов работы.

Выбирая режимы электромагнитного перемешивания для обработки зумповой зоны, следует в максимальной степени учитывать условия формирования твердой

фазы заготовки. По существу, в этой зоне происходит объемная кристаллизация на базе частиц твердой фазы, находящихся в расплаве. Как правило, такая кристаллизация сопровождается появлением твердого каркаса, который по мере его роста становится все более прочным и его составляющие ветви препятствуют подпитке жидкостью донных объемов жидко-твердой ванны, что способствует развитию осевой пористости. Соответственно, для улучшения условий затвердевания последних (донных) объемов непрерывнолитой заготовки представляется целесообразным принудительное разрушение формирующегося каркаса, которое оказывается возможным при возбуждении конвективных потоков.

Наиболее рациональным технологическим приемом представляется формирование принудительных циркуляционных потоков, которые располагались бы в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, так как в этом случае обеспечивается интенсивное перемешивание металла во всем сечении. Создание же принудительных потоков, движущихся вдоль фронта затвердевания, по мнению авторов, не может обеспечить повышения качества заготовки, так как зумпфовая зона обогащена ликватами и, следовательно, движение металла вдоль фронта затвердевания будет способствовать развитию дополнительных ликвационных полос положительной ликвации (типа *V*-образной ликвации).

Анализируя известные экспериментальные результаты по применению электромагнитного перемешивания в зумпфовой зоне, следует отметить, что на практике в большинстве случаев рекомендуется обработка, обеспечивающая формирование циркуляционных потоков в плоскости, перпендикулярной оси заготовки [5, 9, 10]. Рациональный выбор места и интенсивности приложения такого воздействия обеспечивает существенное уменьшение протяженности жидкой лунки и, соответственно, уменьшение количества макродефектов типа усадочная пористость при измельчении зерна кристаллической структуры. При этом практически не поддаются управлению осевые пористость и ликвация, формирование которых происходит на значительном удалении от места приложения воздействия. Не существует также однозначного мнения относительно положительного влияния электромагнитного перемешивания на развитие *V*-образной ликвации. В ряде случаев отмечается увеличение протяженности ликвационных полос. Подавление этой группы дефектов оказывается возможным, видимо, только при использовании так называемого метода «мягкого обжатия» (*soft reduction*), который обеспечивает выдавливание жидкой фазы из лунки за счет обжатия непрерывно литой заготовки на последней стадии затвердевания [21].

Помимо вышеназванных, следует упомянуть еще несколько типов электромагнитных систем, которые не нашли широкого промышленного применения, однако имеют перспективы для него.

Во-первых, речь идет о так называемом «электромагнитном бустере» (*Electromagnetic Booster*) – устройстве, основанном на применении сверхпроводящих магнитов и токоподводящих электродов на финальной стадии кристаллизации непрерывнолитой заготовки (рис. 9) [14]. Так, магнитное поле и постоянный ток генерируют электромагнитную силу, в 20 раз превышающую гравитацию и направленную вдоль оси слитка противоположно направлению литья. Жидкая фаза движется из междендритного пространства противоположно направлению литья. Образовавшиеся в отдельных местах слитка пустоты, вызванные «перехватом» жидкой лунки и являющиеся следствием неравномерности фронта кристаллизации, заполняются жидкой фазой. В результате совместного действия обжимных валков и электромагнитной силы эффект обжатия усиливается.

Также известны специальные электромагнитные системы для контроля процессов

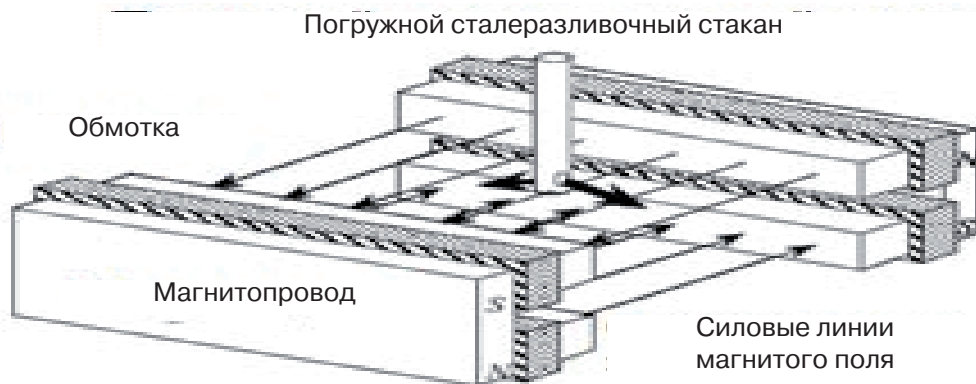


Рис. 5. Электромагнитное устройство FC Mold

Аналогичным FC Mold технологическим решением, которое применяется при разливке стали на сортовую заготовку, является использование электромагнитного перемешивателя MEMS (Mold Electromagnetic Stirrer).

С точки зрения отливки тонких слэбов компанией POSCO созданы специальные перемешиватели (рис. 6, 7). Один из них может перемещаться по высоте кристаллизатора (рис. 6) и обеспечивать различные режимы движения расплава на мениске и на уровне погружного сталеразливочного стакана. Другой перемешиватель создает сильное магнитное поле, используя явление сверхпроводимости (рис. 7) [13].

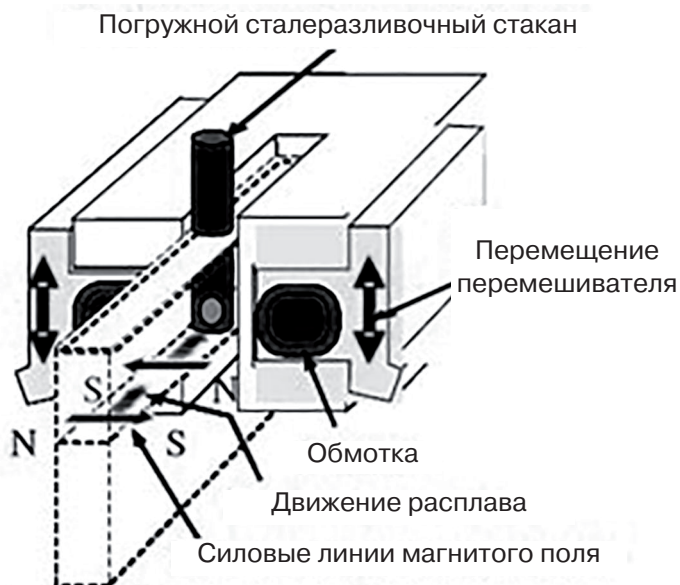


Рис. 6. Движущийся электромагнитный перемешиватель

Для упрощения эксплуатации оборудования все перечисленные устройства, как правило, конструктивно совмещаются с кристаллизатором МНЛЗ. Также при использовании нескольких высокочастотных обмоток имеет место дополнительное отжигание (как при плавке в холодном тигле) затвердевающей заготовки от стенок кристаллизатора, что улучшает качество поверхности слитка и долговечность кристаллизатора, однако несколько ухудшает условия охлаждения заготовки.

В свою очередь, наиболее существенными негативными проявлениями, сопровождающимися наложением электромагнитного воздействия в кристаллизаторе,

1. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Гарнье М. Возможности и перспективы электромагнитной обработки материалов // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 131–140.
3. Открытие № 299 «Закономерность гомогенизации металлического расплава и эжектирование неметаллических включений при наложении вертикальных потоков в расплаве» / Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Дубоделов В.И. и др. // Рег. № АНО/40-09 от 12.12.2005 г. на основании Решения № 181 от 09.12.2005 г. Международной Ассоциации Авторы Научных Открытий.
4. Sh. Asai. Electromagnetic Processing of Materials – The State of the Field and Its Prospects of the International Development // Proceedings of the International Congress on Electromagnetic Processing of Materials «EMP-97». – Paris-La-Defense, France, May 27–29, 1997. – V. 1. – P. 5–12.
5. Бират Ж.-П., Шоне Ж. Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке заготовок, блюмов и слэбов // Достижения в области непрерывной разливки стали. Тр. Международного конгресса. – М.: Metallurgia, 1987. – С. 98–116.
6. Control of nozzle erosion and slag entrapment in billet casting with electromagnetic stirring / E. Favre, S. Kunstreich, W. Courths ea. // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. – Madrid: 1998. – P. 595–604.
7. Metallurgie des Strangießens: Gießen und Erstarren von Stahl / Herausgeber Prof. K. Schwerdtfeger. – Dusseldorf: Stahl und Eisen, 1992. – 655 s.
8. Lipton J., Kurz W., Heinemann L. Modelling Columnar to Equiaxed Transition // J. Concast Technology News. – V. 22. – No. 2. – 1983. – P. 4–6.
9. Tzavaras A. A. Solidification control by Electromagnetic Stirring-State of the art // Continuous Casting. – Michigan: BookCrafters, 1984. – Vol. 3. – P. 47–67.
10. Контроль качества при непрерывной разливке блюмов / М. Накатани, Т. Адачи, Ш. Кимия и др. // Чистая сталь. Сб. научн. тр. – М.: Metallurgia, 1987. – С. 271–285.
11. Эйдем М., Хакль Х., Коллберг С. Применение устройств электромагнитного перемешивания (EMS) и установок электромагнитного торможения (EMBR) при производстве стали // Труды международной конференции «Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке». – М.: Metallurgia, 1994. – Том 1. – С. 231–238.
12. Lee S.M., Cho M.J. Application of Electromagnetic System in a Slab Continuous Casting Machine of POSCO // Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2009». October 19–23, 2009. – Dresden, Germany. – P. 28–33.
13. Непрерывная разливка. Регулирование потока жидкой стали в кристаллизаторе с использованием сверхпроводящих магнитов // ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. – № 1. – 2003. – С. 41–44.
14. Ebisu Y., Sekine K. Method and apparatus for continuous casting. US Patent 6,530,418. Date of Patent: March 11, 2003.
15. Hanazaki K., Miura H., Katogi K. Present monitoring technology and equipment in continuous casting mold and a future view // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 94–97.
16. Fujino Sh., Satou Sh., Taniguchi Sh. et al. Magnetohydrodynamic calculation method for electromagnetic sensor // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 759–764.
17. Zuosheng Lei, Kang Deng, Qisheng Li, Zhongming Ren, Weixuan Li, Yunbo Zhong. Physical simulation on nozzle electromagnetic brake in twin-roll strip casting // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 89–93.
18. Bojarevics V., Taniguchi Sh., Pericleous K. Droplet generation with modulated AC electromagnetic field at nozzle exit // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 259–264.
19. Хашеми С.М., Швердтфегер К. Электромагнитная боковая стенка при литье полосы ленточно-валковым способом // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 177–184.
20. Блазек К. Е., Гербер Х. Г., Сауседо И. Г. Использование переменных магнитных полей для бокового удержания расплава при литье полосы // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 185–191.
21. Hayakawa S., Shikai M., Kashima T. Improvement of center quality of continuous cast round bloom with soft reduction // 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. – Madrid: 1998. – P. 225–233.

22. Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Верзилов А.П. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали // Монография. – К.: Наукова думка. – 2018.
23. Takeachi E., Tanaka H., Kajioka H. Hydromagnetic separation of metal pool in the continuous casting strand // Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Proceedings of Materials «EPM 2009». – Nagoya, Japan, October 25–28, 1994. – P. 364–377.

Поступила 18.10.2018

Reference

1. Smirnov, A. N., Kubersky, S. V., Stepan, E. V. (eds) (2011) Continuous casting of steel. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
2. Garnier, M. (1996) Opportunities and prospects of electromagnetic processing of materials. Magnetic hydrodynamics, Vol. 32, no. 2, pp. 131–140 [in Russian].
3. Discovery No. 299 «Regularity of homogenization of metal melt and ejection of non-metallic inclusions when superimposing vertical flows in the melt». A. Smirnov, V. Pilyushenko, V. I. Dubodolov et al. Reg. no. ANO / 40-09 of 12.12.2005 on the basis of Decision No. 181 of 09.12.2005 of the International Association of Authors of Scientific Discoveries.
4. Asai, Sh. (1997) Electromagnetic Processing of Materials – The State of the Field and Its Prospects of the International Development. Proceedings of the International Congress on Electromagnetic Processing of Materials «EMP-97». Paris-La-Defense, France, May 27–29, 1997. Vol. 1, pp. 5–12 [in English].
5. Birat, J.-P., Schone, J. (1987) Electromagnetic stirring during continuous casting of billets, blooms and slabs. Achievements in the field of continuous casting of steel. Tr. International Congress. Moscow: Metallurgy, pp. 98–116 [in Russian].
6. Favre, E., Kunstreich, S., Courths, W. (1998) Control of nozzle erosion and slag entrapment in billet casting with electromagnetic stirring. 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. Madrid, pp. 595–604 [in English].
7. Metallurgie des Strangiebens: GieBen und Erstarren von Stahl. Herausgeber Prof. K. Schwerdtfeger. Dusseldorf: Stahl und Eisen, 1992, 655 p. [in English].
8. Lipton, J., Kurz, W., Heinemann, L. (1983) Modelling Columnar to Equiaxed Transition. J. Concast Technology News, Vol. 22, no. 2, pp. 4–6 [in English].
9. Tzavaras, A. A. (1984) Solidification control by Electromagnetic Stirring-State of the art. Continuous Casting. Michigan: Book Crafters, Vol. 3, pp. 47–67 [in English].
10. Nakatani, M., Adachi, T., Kimiya, Sh. et al. (1987) Quality control during continuous casting of blooms. Pure Steel. Sat scientific tr. Moscow: Metallurgy, pp. 271–285 [in Russian].
11. Eydem, M., Haki, H., Kollberg, S. (1994) The use of electromagnetic mixing devices (EMC) and electromagnet braking systems (EMRA) in steel production. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Chernaya metallurgiya Rossii i stran SNG v 21 veke». Moscow: Metallurgiya, T. 1, pp. 231–238 [in Russian].
12. Lee, S. M., Cho, M. J. (2009) Application of Electromagnetic System in a Slab Continuous Casting Machine of POSCO. Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2009», October 19–23, 2009. Dresden, Germany, pp. 28–33 [in English].
13. Continuous casting. Regulation of the flow of liquid steel in the mold using superconducting magnets. Chermetinformatsiya OJSC. News of ferrous metallurgy abroad. 2003, no. 1, pp. 41–44 [in Russian].
14. Ebisu, Y., Sekine, K. Method and apparatus for continuous casting. US Patent 6,530,418. Date of Patent: March 11, 2003.
15. Hanazaki, K., Miura, H., Katogi, K. (2006) Present monitoring technology and equipment in continuous casting mold and a future view. The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. Sendai, Japan, pp. 94–97 [in English].
16. Fujino, Sh., Satou, Sh., Taniguchi, Sh. et al. (2006) Magnetohydrodynamic calculation method for electromagnetic sensor. The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. Sendai, Japan, pp. 759–764 [in English].
17. Zuosheng Lei, Kang Deng, Qisheng Li, Zhongming Ren, Weixuan Li, Yunbo Zhong. (2006) Physical simulation on nozzle electromagnetic brake in twin-roll strip casting. The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. Sendai, Japan, pp. 89–93 [in English].
18. Bojarevics, V. Taniguchi, Sh., Pericleous, K. (2006) Droplet generation with modulated AC

- electromagnetic field at nozzle exit. The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006». October 23–27, 2006. Sendai, Japan, pp. 259–264 [in English].
19. Hashemi, S. M., Shverdfeger, K. (1996) Electromagnetic side wall during strip casting using the tape-roll method. *Magnetic Hydrodynamic*, Vol. 32, no. 2, pp. 177–184 [in Russian].
20. Blazek, K. E., Gerber, H. G., Saucedo I. G. (1996) The use of variable magnetic fields for lateral retention of the melt during strip casting. *Magnetic Hydrodynamics*, Vol. 32, no. 2, pp. 185–191 [in Russian].
21. Hayakawa, S., Shikai, M., Kashima, T. (1998) Improvement of center quality of continuous cast round bloom with soft reduction. 3rd European Conference on Continuous Casting. Madrid–Spain, October 20–23, 1998. Madrid: pp. 225–233 [in English].
22. Dubodelov, V. I., Smirnov, A. N., Efimova, V. G., Kravchenko, A. V., Verzilov, A. P. (2018) Hydrodynamic and physicochemical processes in tundishes for the continuous casting of steel: Monograph. K.: Naukova Dumka [in Russian].
23. Takeachi, E., Tanaka, H., Kajioaka, H. (1994) Hydromagnetic separation of metal pool in the continuous casting strand. Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM-1994». Nagoya, Japan, October 25-28, 1994. P. 364–377 [in English].

Received 18.10.2018

В. І. Дубодєлов, д-р техн. наук, акад., зав. відділом, e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

О. М. Смирнов, д-р техн. наук, провідн. наук. співр., e-mail: stalevoz@i.ua

О. П. Верзилов, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: verzilovalex@gmail.com

Ю. Ю. Куліш, інженер 1 кат., e-mail: deatherob@gmail.com

Д. І. Гойда, мол. наук. співр., e-mail: goyदानил@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ПРИБЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ СТАЛІ

Виконано огляд сучасних методів електромагнітного впливу на метал при безперервному розливанні сталі. Показано особливості використання електромагнітного впливу в проміжному ковші, кристалізаторі, зоні вторинного охолодження і фінальній зоні твердіння. Позначено області застосування таких електромагнітних систем для розливання різного сортаменту сталей.

Ключові слова: електромагнітний вплив, магнітна гідродинаміка (МГД), машина безперервного лиття заготовки (МБЛЗ), електромагнітне перемішування, двокамерні проміжні ковші.

V.I. Dubodelov, Doctor of Engineering Sciences, Academician, Head of Department, e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

A. N. Smirnov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher, e-mail: stalevoz@i.ua

A. P. Verzilov, Candidate of Engineering Sciences, Researcher, e-mail: verzilovalex@gmail.com

U.U. Kulish, 1st category Engineer, e-mail: deatherob@gmail.com

D.I. Goyda, Junior Researcher, e-mail: goyदानил@gmail.com

Physico- Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kiev

APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN CONTINUOUS STEEL CASTING

A review of modern methods of electromagnetic effects in the metal during continuous casting of steel is presented. The features of the use of electromagnetic effects in tundish, mold, secondary cooling zone and final solidification zone are shown. The areas of application of such electromagnetic systems for the casting of various steel grades are indicated.

Keywords: electromagnetic effects, magnetic hydrodynamics (MHD), continuous casting machine (CCM), electromagnetic mixing, two-chamber tundish.