

# ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ И ГИБКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИКРО-ЗАВОДАХ

В.И. Дубоделов<sup>1</sup>, А.Н. Смирнов<sup>1</sup>, С.В. Куберский<sup>2</sup>, М.С. Горюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины.

03680, г. Киев-142, ГСП, бульв. Академика Вернадского, 34/1. E-mail: metal@ptima.kiev.ua

<sup>2</sup>Донбасский государственный технический университет.

93100, г. Лисичанск, Луганская обл., пр. Ленина, 84. E-mail: donstu.lisichansk@ukr.net

Проведен комплексный анализ возможностей повышения конкурентоспособности металлургического микро-завода за счет использования инновационных решений в части повышения качества стали и эффективности ее разливки. Рассмотрены преимущества использования в структуре микро-заводов различных способов разливки стали с использованием машин непрерывного и полунепрерывного литья радиального, вертикального и горизонтального типа, а также литейно-прокатных модулей для разливки металла на колесо и центробежной литейной машины. Показаны преимущества использования электромагнитного перемешивания на разливочных агрегатах с небольшой скоростью вытягивания заготовки, а также целесообразность применения в их конструкции мультифункционального магнитодинамического промежуточного ковша для реализации комплекса технологических операций свойственных современным агрегатам «ковш-печь». Библиогр. 23, ил. 3.

**Ключевые слова:** микро-завод; технологическая схема; сталь; непрерывная разливка; электромагнитное воздействие; промежуточный ковш; доводка; эффективность; качество

Одной из тенденций развития металлургии в части создания высокоэффективных технологических построений является концепция металлургических микро-заводов, которые обеспечивают снижение удельных показателей по капиталоемкости производства, уменьшение энергозатрат, оптимизацию расходов сырья и материалов на единицу готовой продукции, а также снижение нагрузки на окружающую среду. Не менее важным преимуществом современных микро-заводов является широкое использование сырья и расходных материалов, расположенных вблизи конкретного предприятия. Инициаторами создания новых высокоэффективных металлургических заводов обычно являются заготовители-переработчики лома или фирмы, торгующие металлопрокатом, а также предприятия, реконструирующие или развивающие свои металлургические производства. В зависимости от объемов и сортамента микро-заводы могут выпускать от нескольких десятков до 150...200 тыс. т готовой продукции в год [1–3].

Основной специализацией микро-заводов является производство продукции массового спроса ограниченного сортамента (например, строительная арматура), либо, наоборот, высококачественной (сортовой прокат машиностроительного назначения, качественная катанка и т. д.) с высокой добавленной стоимостью. В случае выпуска высококачественной продукции на первое место выходят вопросы обеспечения предприятия качественными сырьевыми материалами, современными технологиями и оборудованием, а также сред-

ствами автоматизации. Таким образом, микро-завод может производить практически любые виды продукции, которые необходимы заказчику при наличии соответствующих технологий и оборудования, внедрение которых определяется в первую очередь рентабельностью производства. Соответственно технологические схемы металлургических микро-заводов в зависимости от конкретных условий могут трансформироваться от простых узкоспециализированных однониточных с ограниченным сортаментом продукции до сложных универсальных и многовариантных.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно утверждать, что металлургический микро-завод следует рассматривать как систему совмещенных технологий и агрегатов с гибкой структурой, максимально адаптированную к местным условиям и потребностям рынка. К характерным особенностям подобных производств относятся: модульный принцип построения оборудования и технологического процесса, позволяющий существенно снизить затраты на инжиниринг и технологическую подготовку производства; размещение завода в непосредственной близости к потребителям, что позволяет существенно снизить транспортные расходы и упростить логистику; использование в качестве основного шихтового материала стального лома, образующегося непосредственно в регионе расположения предприятия; компактная планировка и, соответственно, размещение на ограниченных площадях; минимальные удельные капитальные затраты и пр.

Целью настоящей работы является проведение комплексного анализа возможностей повышения конкурентоспособности металлургического микро-завода за счет использования инновационных решений в части повышения качества стали и эффективности ее разливки.

Наибольшее распространение в металлургии получили микро-заводы с «классическим» построением, включающим дуговую сталеплавильную печь (с массой плавки 10...20 т), агрегат ковш-печь (АКП) для доводки стали, а также одно- или двухручьевую сортовую (блочную) машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) (рис. 1) [4–6].

Ключевыми элементами, обеспечивающими эффективность и рентабельность работы такого завода, являются функционирование АКП для малых объемов стали, а также компактность сортовой МНЛЗ радиального типа (величина радиуса 3,5...4,0 м). Известно, что использование АКП для объемов стали в ковше менее 12...15 т имеет серьезные ограничения, которые связаны с техникой подогрева металла в ковше. Небольшой внутренний диаметр ковша фактически ограничивает подвод тепла при дуговом подогреве вследствие того, что близость расположения электродов и огнеупоров в шлаковом поясе приводит к интенсивному износу последних и быстрому выводу ковша из эксплуатации. Для принудительного перемешивания стали в ковше достаточно широко используется электромагнитное перемешивание. При этом индуктор располагается на внешней стороне стенки сталеразливочного ковша [7], а кожух в месте установки индуктора выполняется из немагнитной нержавеющей стали.

Компактность сортовой МНЛЗ достигается, прежде всего, благодаря уменьшению радиуса машины. Как правило, радиус сортовой МНЛЗ микро-заводов и протяженность главной технологической линии в 2...2,5 раза меньше, чем высокопроизводительной сортовой МНЛЗ (например, современного мини-завода). Это оказывается возможным за счет уменьшения скорости вытяжки заготовки до 1,5...2,0 м/мин и менее. Для сравнения на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ скорость вытяжки достигает 5...6 м/мин, что соответствует разливке 200...250 тыс. т заготовки на один ручей в год.

Для высококачественных заготовок больших сечений (блоч 160×160 мм и более) представ-

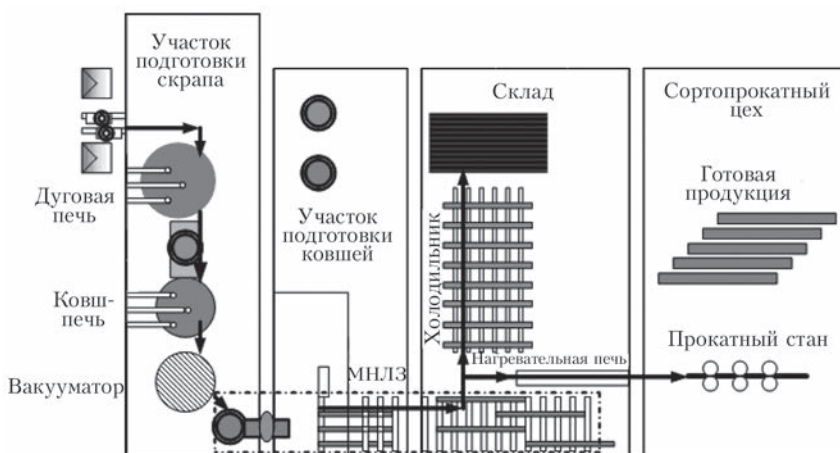


Рис. 1. Общая схема построения металлургического микро-завода

ляется целесообразным использование вертикальных машин полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ) с небольшой скоростью вытяжки (0,10...0,50 м/мин) [8]. Между тем, как показывает практика развития металлургических микро-заводов, одним из важных преимуществ таких производств является возможность выполнения малых (несколько тонн) заказов в предельно сжатые сроки. Для такого рода производств целесообразно иметь плавильные агрегаты (дуговые или индукционные) с массой плавки 5...10 т. В этом случае возникает проблема обеспечения выхода годной заготовки, что достигается рациональным выбором агрегатов для разливки металла. В зависимости от сечения заготовки разливку металла целесообразно осуществлять на МПНЛЗ вертикального типа (большие сечения), либо горизонтального (малые сечения) [7–9].

Вертикальные МПНЛЗ получили достаточно широкое распространение в промышленности как при разливке цветных сплавов, так и при литье стали. Фактически на МПНЛЗ могут разливаться заготовки различных сечений и качества в зависимости от требований потребителей. При этом в отличие от радиальных МНЛЗ заготовки в процессе затвердевания не подвергаются растягивающим деформациям, что дает возможность разливать хрупкие и трещиностойкие стали. Высокое качество заготовок (круг, квадрат), которые потребляются преимущественно машиностроительными предприятиями, достигается комплексной доводкой стали в ковше, применением систем электромагнитного перемешивания, установленных в кристаллизаторе, а также в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) [9].

Для повышения качества структуры заготовки на современных МПНЛЗ применяют электромагнитное воздействие в кристаллизаторе (вращение металла в горизонтальной плоскости) и в нижней части ЗВО [9, 10]. Эффективность такой электромагнитной обработки весьма высока, поскольку

скорость вытяжки заготовки на таких машинах, как правило, сравнительно низкая, и время непосредственного воздействия на затвердевающую заготовку оказывается достаточным для подавления столбчатой структуры, повышения физической и химической однородности в слитке. Экономически важным эффектом при этом является уменьшение глубины проникновения усадочной раковины за счет принудительного перемешивания металла в головной части отливаемой заготовки.

Горизонтальные машины непрерывного литья заготовки (ГМНЛЗ) имеют достаточно серьезный спектр технологических и конструкционных преимуществ, которые проявляются именно при разливке качественных сталей небольшими объемами на заготовки малых сечений. В большинстве конструкций ГМНЛЗ промежуточный ковш и кристаллизатор совмещены в единую систему, что упрощает процесс дозирования и существенно снижает вторичное окисление металла [11–13]. Известны также технические решения, в которых стыковка кристаллизатора осуществляется непосредственно с плавильным агрегатом.

Основные преимущества ГМНЛЗ следующие: минимальная строительная высота, при которой возможно размещение их в существующих сталеплавильных цехах литейных и машиностроительных предприятий, а также удобство при монтаже и обслуживании оборудования, расположенного в одну линию; благодаря горизонтальному расположению технологической линии конструкция приобретает дополнительную гибкость, что позволяет при незначительных затратах менять технологическую длину машины, количество, конструкцию, расположение ЗВО и устройств для ЭМП, оперативно настраивать машину при переходе на разливку нового сечения; отсутствие вторичного окисления на участке промежуточный ковш (металлоприемник)–кристаллизатор создает благоприятные условия для разливки заготовок малых сечений (например, круг диаметром 60...80 мм); отсутствие пластической деформации заготовки в процессе литья, что характерно, например, для радиальных МНЛЗ. Можно также добавить, что подача жидкого металла на мениск в вертикально расположенный кристаллизатор с малым сечением сама по себе представляется технически сложной задачей. Это обстоятельство особенно важно при работе со сталями, которые раскислены алюминием и борсодержащими лигатурами. При разливке таких сталей обычно наблюдается зарастание внутренней полости дозирующего устройства, что в значительной степени затрудняет процесс литья и влияет на качество получаемых заготовок.

Самостоятельным направлением применения концепции металлургических микро-заводов

может быть создание на машиностроительных предприятиях, имеющих в своем составе сталеплавильные цеха, литейно-прокатного модуля, который выпускал бы длинномерную прокатную продукцию непосредственно для нужд данного региона. Особенностью работы модуля для получения сортового проката является необходимость уменьшения поперечного сечения заготовки и увеличения скорости ее вытяжки. Так, весьма перспективным техническим решением представляется получивший распространение способ разлива цветных металлов и сплавов на вращающееся колесо (рис. 2) [14, 15].

Производительность такого литейно-прокатного модуля (6,0...14,5 т/ч) полностью соответствует требованиям, которые предъявляются к микро-заводам. В то же время, как показали промышленные исследования, при такой системе разливки необходимо предусматривать специальные меры по минимизации потерь тепла металлом в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

Аналогичная технологическая схема вполне может найти применение и при разливке стали на сортовую заготовку. Безусловно, при этом понадобятся новые технические решения в части организации подвода стали, ее дозирования, поддержания стабильной температуры разливки, а также гармонизации величины предельной скорости деформации при разгибе заготовки и скорости ее вытяжки. Например, по данным японской компании Hitachi, кондиционная сортовая заготовка (трапеция, высота заготовки — 128, ширина — 160×130 мм) получается при использовании компактного литейно-прокатного модуля на базе роторной МНЛЗ (высота по сталеразливочному ковшу 8...10, длина 36...40 м, диаметр колеса 3000 мм, скорость разливки 4,2 м/мин) [16].

При разливке сравнительно небольших объемов стали (несколько тонн) большой интерес представляют специальные решения дискретной разливки на мерные сортовые заготовки. Например, таким технологическим агрегатом может быть специальная центробежная машина, позволяющая получать кольца определенного диаметра с сечением, которое близко к сечению сортовой заготовки [17]. Полученную кольцевую заготовку в правильно-деформирующей машине разрезают на ножницах, предварительно разгибают гидравлическим разгибом с получением промежуточной заготовки С-образной формы, прокатывают между двух валков в один проход в прямолинейную полосу, являющуюся подкатом для мелкосортного прокатного стана. При этом обеспечивается возможность прямого совмещения процессов разлива и прокатки, что в значительной степени повышает эффективность работы микро-завода.

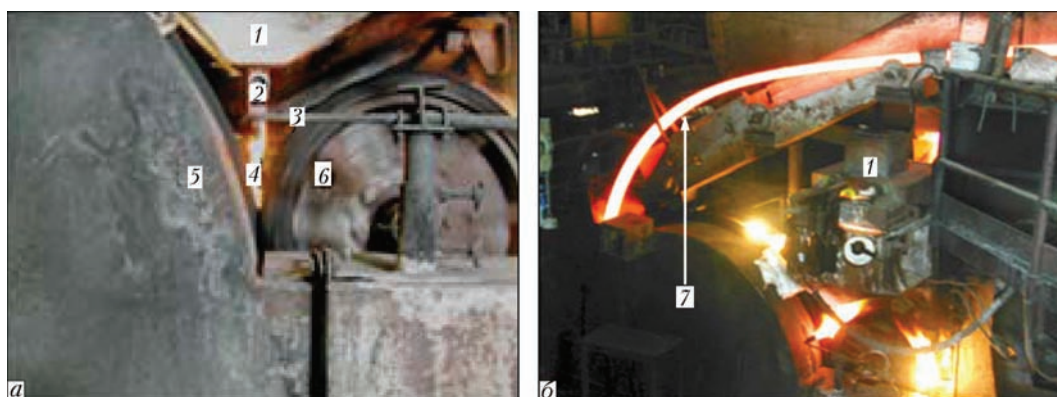


Рис. 2. Процесс подачи расплава в кристаллизатор (а) и выхода заготовки с колеса (б) на роторной МНЛЗ: 1 — промежуточный ковш; 2 — керамический стакан; 3 — газовая горелка для подогрева расплава; 4 — струя расплава; 5 — рабочее колесо в защитном кожухе; 6 — прижимной ролик; 7 — непрерывная заготовка

В структуре современного металлургического микро-завода могут использоваться как отдельные виды перечисленных выше разливочных агрегатов, так и несколько одновременно. Это обусловлено, с одной стороны, широким спектром номенклатуры производимой такими предприятиями продукции для обеспечения высокого уровня конкурентоспособности, а с другой — относительно низкой стоимостью машин для разлива небольших объемов металла. К примеру, ПАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов» использует в своей технологической схеме МПНЛЗ, ГМНЛЗ, а также литейно-прокатный модуль для разлива на колесо, что позволяет ему производить различные профили, начиная с заготовок для прокатки листа до прутков и труб.

В целом рассмотренные выше технические решения и технологические построения позволяют утверждать, что выплавка и разлива стали небольшими объемами дают возможность существенно трансформировать систему технологических операций и скорректировать работу основных агрегатов применительно к конкретному микро-заводу. Например, при определенных конструктивных решениях доводку стали по температуре, химическому составу и качеству можно осуществлять непосредственно в промежуточном ковше (ПК), что позволит вынести из ковша большую часть операций, которые в традиционной металлургии выполняются в АКП.

Концепция многофункционального магнитодинамического промежуточного ковша (МД-ПК), который обеспечивает подогрев и разливу металла, а также его рафинирование, разработана в Физико-технологическом институте стали и сплавов Национальной академии наук Украины [18–21]. Такой ПК наиболее эффективен при разливе качественных марок сталей на заготовки малых сечений. Как правило, такие стали производятся сравнительно небольшими партиями, что затрудняет их доводку в небольших сталеразливочных ковшах в силу боль-

ших потерь тепла и высоких удельных затрат на огнеупоры. Соответственно в ПК в этом случае переносится основная часть технологических операций по доводке стали. Конструктивное решение для таких ПК представлено на рис. 3.

Одной из основных особенностей предложенного ПК является возможность управления (за счет бесконтактного и малоинерционного действия электромагнитных полей) циркуляцией между индукционным каналом и тиглем и разливкой жидкого металла. Также возможна установка дополнительного электромагнитного перемешивателя (ЭМП) на боковой стенке или под днищем тигля ПК, что позволяет управлять движением циркуляционных потоков в жидкометаллической ванне. Рациональной траекторией движения таких потоков является их перемещение снизу вверх и затем вдоль границы, разделяющей покровный шлак и сталь. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для всплытия и ассимиляции неметаллических включений, которые негативно влияют на прочностные показатели металлопродукции. Дополнительным преимуществом ЭМП при этом является возможность управления конвективными потоками, что имеет большое значение в случае изменения уровня налива металла в ПК.

Возможность индукционного подогрева стали непосредственно при ее сливе из ПК позволяет в случае необходимости обеспечивать регламентированный нагрев стали, подаваемой в кристаллизатор. Такой метод подогрева стали позволяет оперативно корректировать температуру металла в случае ее падения ниже требуемой для нормальной разлива. Характерной особенностью этого процесса подогрева является высокая скорость нагревания металла, которое происходит без угара и вторичного окисления. Индукционный нагрев металла оказывается особенно эффективным для МНЛЗ и МПНЛЗ, на которых разливаются заготовки малых сечений при низких скоростях литья. Это особенно актуально при серийной непрерыв-

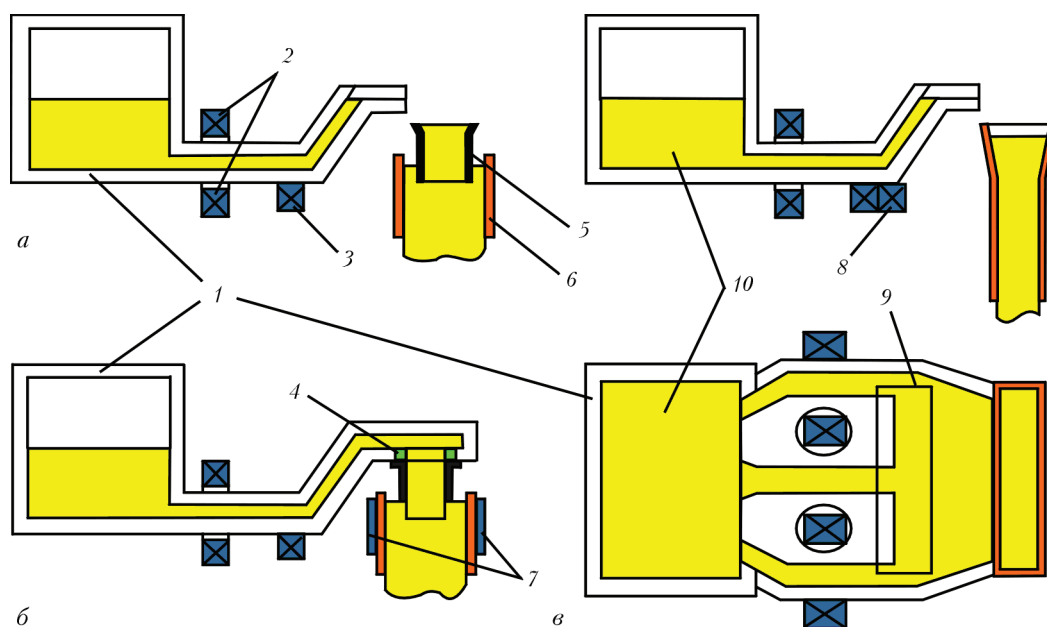


Рис. 3. Схема разливки стали через многофункциональный МД-ПК с применением электромагнитных воздействий: *а* — полунепрерывная разливка; *б* — непрерывная разливка сортовой заготовки и блюмов; *в* — непрерывная разливка тонкого сляба; 1 — МД-ПК; 2 — индуктор; 3 — электромагнит для создания электромагнитной силы, обеспечивающей перемешивание и разливку стали; 4 — герметизирующая прокладка; 5 — погружной стакан; 6 — кристаллизатор; 7 — пульсационный ЭМП; 8 — электромагнитное устройство для рассредоточения струи стали по ширине сляба в кристаллизаторе; 9 — зона создания электромагнитной силы при разливке металла из ПК в кристаллизатор тонкослябовой МНЛЗ; 10 — жидкая ванна

ной разливке в период замены одного сталеразливочного ковша на другой.

В предлагаемой схеме возможности разливки на квадратные и круглые заготовки малых сечений могут быть расширены благодаря прямой связи ПК с кристаллизатором посредством наклонного металлопровода, оснащенного электромагнитным устройством для дозированной подачи стали. Применение такого устройства расширяет функциональные возможности ПК, поскольку требуемый расход металла, подаваемого в кристаллизатор, обеспечивается работой электромагнитного устройства и мало зависит от уровня налива металла в промежуточном ковше. Соответственно допустимый уровень металла в ПК в момент окончания разливки, обусловленный эффектом воронкообразования при традиционных схемах дозирования стали в кристаллизатор, может быть значительно уменьшен. Дополнительным преимуществом рассматриваемой схемы подачи металла в сравнении с традиционной, включающей вытекание стали из стакана-дозатора ПК, расположенного над кристаллизатором, является существенное уменьшение ферростатического напора падающей струи. В этом случае соответственно снижается глубина проникновения падающей струи в жидкую ванну отливаемого слитка, что следует рассматривать как фактор, обеспечивающий улучшение качества.

В целом разработанный multifункциональный МД-ПК (рис. 3), обеспечивающий гомогенизацию жидкой стали, подогрев ее для поддер-

жания необходимых температурных параметров, а также высокую чистоту по содержанию неметаллических включений посредством наложения электромагнитных воздействий на расплав, может быть достойной альтернативой классическому АКП. При этом такая обработка стали фактически совмещается с литейным агрегатом, что позволяет максимально оперативно управлять качеством металла и параметрами литья.

Принимая во внимание тот факт, что специфика функционирования микро-завода обуславливает создание гибких и квазибезынерционных технологических процессов, которые должны обеспечивать минимальные потери металла при разливке даже небольших партий, роль ПК как multifункционального агрегата значительно возрастает. Между тем известно, что основные потери стали при разливке на МНЛЗ и МПНЛЗ обычно обусловлены остатком металла в ПК, который образуется по окончании процесса литья. Возможность подогрева и принудительного перемешивания металла позволяет использовать его в следующем цикле разливки и соответственно уменьшить потери стали.

Еще одним серьезным источником потерь металла при разливке является обрезь заготовки, которая обусловлена проникновением усадочной раковины вглубь слитка при затвердевании последних порций металла. При этом масса металла, теряемого с обрезью, может колебаться в значительных пределах и составлять 5...15 % в зависимости от сечения разливаемой заготовки.

Уменьшение глубины проникновения усадочной раковины вглубь слитка может быть достигнуто путем доливки определенной массы жидкого металла в головную его часть. В технологическом плане реализация процесса доливки металла в кристаллизатор МНЛЗ или МПНЛЗ традиционного типа крайне сложна. Вместе с тем применение для разливки рассмотренного в настоящей статье мультифункционального МД-ПК может быть вполне оправданным и эффективным.

Дополнительный положительный эффект в улучшении качества заготовки возможен при использовании устройства для электромагнитного перемешивания стали, которое целесообразно устанавливать в зоне вторичного охлаждения под кристаллизатором [22, 23]. Для МНЛЗ и МПНЛЗ, разливающих сталь с невысокой скоростью вытяжки заготовки, перемешивание жидкой ванны и принудительная конвекция у фронта кристаллизации осуществляется практически по всей высоте слитка. При этом металл в жидкой ванне постоянно циркулирует сначала через область действия электромагнитного поля, где он закручивается в горизонтальные потоки, а затем опускается в нижние горизонты и вовлекает в перемешивание слои металла, которые расположены у фронта затвердевания. Новым управляющим элементом предлагаемого комплексного электромагнитного перемешивателя является многофазный индуктор, который создает в жидкой стали силы, компенсирующие силу тяжести, и направленные против движения поступающей в кристаллизатор стали. Эти силы являются достаточными для регулирования подачи стали вплоть до состояния частичной левитации. Ток, подаваемый в индуктор (электромагнит), является полигармоническим и программируется посредством специального преобразователя частоты. Несущая частота тока 80...110 Гц, частота основной гармоники, создающая пульсации магнитного давления и акустические волны, равна частоте собственных колебаний жидкой ванны слитка. Совпадение этих частот обеспечивает акустический резонанс и высокий уровень амплитуд давления. При резонансе амплитуда давления вблизи дна кратера в 4...5 раз превышает это давление на мениске, обеспечивая достаточный уровень пульсации скорости жидкой фазы на фронте кристаллизации.

Преимущества конструкции предлагаемого комплексного ЭМП следующие: уменьшается скорость движения струи жидкой стали при заливке в кристаллизатор, что устраняет проблему возникновения вихрей и исключает попадание в жидкую часть слитка включений (шлакообразующая смесь, пузырьки газа и т. д.); уменьшается глубина следов качания на поверхности слитка и

снижается вероятность возникновения поперечных поверхностных трещин и других дефектов (наплывы, раковины); принудительное перемешивание способствует образованию дополнительных центров кристаллизации и росту равноосных кристаллов за счет снижения интенсивности роста крупных дендритных кристаллов и обламывания их вершин.

## Выводы

1. Расширение области применения микро-заводов позволяет производить металлопродукцию небольшими партиями и обеспечивать потребности определенного региона. Конкурентоспособность таких заводов достигается за счет обеспечения высокого качества металлопродукции широкого марочного состава и типоразмеров при условии минимизации издержек на производство и логистику. Особенно высокий уровень добавленной стоимости на таких предприятиях обеспечивается при производстве небольших партий продукции из специальных и сложнотермических сталей, отвечающих необходимому уровню эксплуатационных характеристик, согласованных с заказчиком.

2. Специфика работы микро-заводов превращает в востребованные гибкие квазибездинамические методы доводки стали, в том числе использующие электромагнитные воздействия, обеспечивающие принудительное перемешивание металла, его подогрев и подачу (дозирование) в кристаллизатор. Применительно к микро-заводом наибольший интерес представляет концепция мультифункционального МД-ПК, приближающегося по своим возможностям к известным АКП. Такой ПК создаст дополнительные возможности для организации разливки стали с высоким выходом годной высококачественной заготовки и обеспечивает снижение расхода материалов.

3. Благодаря относительно малым объемам производства и небольшим партиям разливаемой стали, в условиях микро-завода появляются дополнительные возможности по применению оригинальных машин и агрегатов для разливки стали, которые позволяют получать заготовку, приближенную по сечению к конечной продукции. К числу таких МНЛЗ и МПНЛЗ следует отнести горизонтальные машины для разливки круга и квадрата небольшого сечения, а также литейно-прокатные модули для разливки металла на колесо. Технология производства сортового проката на новых и действующих прокатных станах микро-заводов должна осуществляться из заготовок оптимальных размеров сечения и массы. Это обеспечит уменьшение расходного коэффициента металла, его угара, количества окалина на 30...60 % и величины концевой обрезки от 20 до 70 % за счет

увеличения выхода мерных длин в зависимости от вида выпускаемой продукции.

4. Для сечений большего размера, по-прежнему, представляется эффективным применение МПНЛЗ вертикального типа, оборудованных электромагнитным перемешивателем, расположенным под кристаллизатором. При этом широкий спектр точных заготовок машиностроительных деталей и готовых изделий (шаров, втулок, осей, звездочек) может быть получен путем применения на заключительной стадии различного деталяпрокатного оборудования.

1. *Запскалов Н.М.* Мини металлургические заводы: основы успеха // *Сталь*. — 2013. — № 9. — С. 84–92.
2. *Инновационное* развитие малых металлургических заводов как ключевое направление модернизации сталеплавильного комплекса Украины / В.И. Дубоделов, А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, М.С. Горюк // *Вісн. Нац. акад. наук України*. — 2015. — № 12. — С. 33–45.
3. *Лякишев Н.П., Николаев А.В.* Металлургия стали на пороге третьего тысячелетия // *Электрометаллургия*. — 2002. — № 1. — С. 3–13.
4. *Металлургические* мини-заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохов, А.Ю. Цупрун. — Донецк: Норд-Пресс, 2005. — 469 с.
5. *Протасов А.В., Пасечник Н.В., Сивак Б.А.* Электрометаллургические мини-заводы. — М.: Металлургиядзат, 2013. — 420 с.
6. *Проектирование* и строительство металлургического микро-завода / А.Б. Стеблов, С.Н. Березов, М.М. Таирбеков, И.В. Дуброва // *Литье и металлургия*. — 2013. — № 1. — С. 17–19.
7. *Некоторые* аспекты организации производства в условиях современного микро-завода / А.Н. Смирнов, А.Ю. Цупрун, Е.В. Штепан, Е.В. Новикова // *Металл и литье Украины*. — 2009. — № 1–2. — С. 15–19.
8. *Марченко И.К.* Полунепрерывное литье стали. — М.: Металлургия, 1986. — 246 с.
9. *Певзнер Б.В.* Получение слитков большого сечения с улучшенной макроструктурой на УПНРС металлургического завода «Электросталь» // *Новые направления в развитии оборудования непрерывной разливки металлов*. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. — С. 51–55.
10. *Сивак Б.А., Майоров А.И., Ротов И.С.* Горизонтальные машины непрерывного литья заготовок: состояние и перспективы // *Черная металлургия: Бюл. АО «Черметинформация»*. — 1998. — Вып. 9–10. — С. 7–24.
11. *Койано Т., Ито М.* Разработка и промышленное применение процесса горизонтальной непрерывной разливки на МНЛЗ компанией «Ниппон Кокан» // *Достижения в об-*

ласти непрерывной разливки стали. — М.: Металлургия, 1987. — С. 210–220.

12. *Реушетов В.В., Костин В.Н., Трушин А.И.* Горизонтальные машины непрерывного литья стальных заготовок // *Металлургические процессы и оборудование*. — 2006. — № 2. — С. 24–32.
13. *Швердтфегер К.* Непрерывная разливка стали на горизонтальных МНЛЗ // *Черные металлы*. — 1986. — № 1. — С. 3–11.
14. *Arderiu O.G., Properzi G.* Continuous Copper Rod Production from 100 % Scrap / *Proc. 65<sup>th</sup> Annual Convention of the Wire Assoc. Intern. Atlanta, Georgia, USA, Mar. 1995* // *Wire J. Intern.* — 1996. — P. 75–82.
15. *Шутов И.В., Смирнов А.Н., Куберский С.В.* Литейно-прокатный модуль для получения катанки из рафинированной меди // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2011. — № 6. — С. 44–46.
16. *Investigation of Steel Billets Produced by a Rotary Type Continuous Caster* / T. Aizawa, E. Niyama, H. Kodama et al. // *Transaction ISIJ*. — 1984. — 24. — P. 992–998.
17. *Злобин А., Злобин С.* Судовой металлургический комплекс // *Металлоснабжение и сбыт*. — 2012. — № 11. — С. 112–119.
18. *The magnetodynamic tundish for continuous casting of steel* / V. Dubodelov, A. Smirnov, V. Pogorsky, M. Goryuk. // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Symp. on Electromagnetic Proc. of Materials («EPM 2006»)*. — Sendai, Japan, Oct. 23–27, 2006. — P. 114–119.
19. *Новые* технологические процессы непрерывной разливки стали с применением магнетодинамического промежуточного ковша В.И. / Дубоделов, А.Н. Смирнов, В.К. Погорский, М.С. // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. — 2010. — № 1. — С. 96–101.
20. *Электромагнитные* воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл при непрерывной разливке стали: перспективы использования мирового опыта и отечественных разработок в металлургии Украины / В.И. Дубоделов, М.С. Горюк, А.Н. Смирнов, А.Ф. Колесниченко // *Сб. научн. тр. Междунар. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине»*. — Донецк, 4–5 ноября 2010 г. — С. 353–366.
21. *Features of functioning of magnetodynamic tundish at continuous casting of steel* / V. Dubodelov, O. Smirnov, M. Goryuk et. al. // *Proc. of the 8<sup>th</sup> Intern. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015*. — Cannes, France, Oct. 12–16, 2015. — SIMAP Laboratory — EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. — P. 625–628.
22. *Аникеев В.В.* Полунепрерывная разливка сплошных и полых слитков в машиностроении // *Электрометаллургия*. — 2013. — № 8. — С. 9–17.
23. *Innovative combinations of MHD technologies and original electromagnetic devices for highly efficient casting on CCM* / V. Dubodelov, O. Smirnov, S. Louhenkilpi, A. Kolesnichenko // *Ibid.* — P. 621–624.

An integrated analysis of feasibilities of increasing the competitive capabilities of the metallurgical micro-plant was carried out at the expense of application of the innovation solutions with increasing the steel quality and efficiency of its casting. Advantages of applying of different methods of steel casting in the structure of micro-plants are considered by using machines of the continuous and semi-continuous casting of a radial, vertical and horizontal type, and also casting-rolling modules for metal casting to the wheel of a centrifugal casting machine. Shown are the advantages of using the electromagnetic stirring in different units at a low rate of the billet withdrawal, as well as the rationality of application of a multi-functional magneto-dynamic intermediate ladle in their design for realization of a complex of technological operations typical for modern «ladle-furnace» units. 23 Ref., Figures 3.

**Key words:** *micro-plant; process flowsheet; steel; continuous casting; electromagnetic effect; intermediate ladle; finishing; efficiency, quality*

Поступила 09.02.2016