МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

С. И. ШАХОВ¹, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, omnlm@vniimetmash.ru; Д. С. ШАХОВ²

(¹ АО АХК “ВНИИМЕТМАШ им. академика А.И. Целикова”, Россия, г. Москва;

² Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Россия, г. Москва)

Аннотация. Для предотвращения образования или подавления развития кристаллизационных, усадочных и ликвационных дефектов применяются различные методы физического воздействия на затвердевающий расплав. При выборе технологии в каждом конкретном случае следует исходить прежде всего из ее экономической, эффективности и экологических норм.

Рассмотрены методы физического воздействия на кристаллизующийся слиток: электрогидроимпульсное воздействие; газоимпульсное перемешивание; ввод модификаторов, инокуляторов; ввод расходимых холодильников; ультразвуковое воздействие; “мягкое” обжатие; электромагнитное перемешивание (ЭМП).

По мнению авторов статьи, ЭМП жидкой лунки непрерывного слитка является наиболее эффективным способом активного вмешательства в процесс кристаллизации непрерывного слитка непосредственно по ходу разлива с гарантированной возможностью управления процессом структурообразования. В настоящее время в мировой практике ЭМП жидкого металла на МНЛЗ стало неотъемлемой частью прогрессивной технологии получения высококачественных заготовок. В результате рост требований к качеству продукции и развитие эффективных методов и средств электромагнитной обработки расплавов привели к тому, что в контрактные требования к качеству непрерывнолитых заготовок вносятся положения об обязательном использовании ЭМП при производстве продукции из высококачественных сталей.

Показано, что для устранения ряда дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки, связанных с процессом кристаллизации, усадочными и ликвационными явлениями, которые не могут быть полностью устранены даже при оптимальных конструктивных особенностях оборудования МНЛЗ и рациональных технологических параметрах процесса непрерывного литья, необходимо дополнительное применение методов физического воздействия на процесс затвердевания жидкой стали. Применяемый способ зависит от технологии непрерывной разлива и существующего оборудования МНЛЗ.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали; кристаллизующийся слиток; методы физического воздействия; устранение дефектов макроструктуры.

Ссылка для цитирования. Шахов С.И., Шахов Д.С. Модернизация машин непрерывного литья стали с целью повышения качества готовой продукции // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 10. С. 50–60.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-10-50-60

Машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) являются одним из основных звеньев в технологическом цикле сталеплавильного производства. В 2016 г. в мире на МНЛЗ было разлито 96,1 %, или 1564,2 млн т, от всей произведенной стали, в том числе в России — 81,9 %, или 58,0 млн т [1].

При работе в условиях рыночной экономики перед руководством металлургических заводов возникает необходимость в снижении издержек производства, расширении выпускаемого сортамента и улучшении качества готовой продукции. Решение этих задач невозможно без оптимизации технологических параметров литья с одновременным улучшением поверхности и макроструктуры непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) и проката.

Качество производимых НЛЗ определяется рядом технологических мероприятий, в том числе выбором режимов и параметров литья, применяемыми огнеупорами на участке сталеразливочный ковш – кристаллизатор МНЛЗ, защитой стали от вторичного окисления, опти-

мальными значениями температурного режима и скоростью разлива, а также конструктивными особенностями и состоянием оборудования МНЛЗ. Высокие требования к качеству заготовок приводят к необходимости тщательной подготовки жидкой стали к разливу и применения ряда ограничений, например, по скорости литья и температуре, что не только уменьшает производительность МНЛЗ, а в ряде случаев вызывает ухудшение качества готовой продукции.

Анализ и учет особенностей гидродинамики движения расплава, тепломассопереноса и физико-химических процессов, происходящих на стадии затвердевания, позволяет разработать соответствующие мероприятия по усовершенствованию технологии разлива, конструкции машины и кристаллизатора [2]. Однако существует ряд дефектов макроструктуры НЛЗ, связанных с процессом кристаллизации, усадочными и ликвационными явлениями, которые не могут быть полностью устранены даже при оптимальных конструктивных особенностях оборудования

МНЛЗ и рациональных технологических параметрах процесса непрерывного литья.

В связи с этим очевидно, что для получения качественной макроструктуры НЛЗ и проката особенно из сталей ответственного назначения необходимо активное вмешательство в процесс кристаллизации непрерывного слитка непосредственно по ходу разливки с гарантированной возможностью управления процессом структурообразования.

Для предотвращения образования или подавления развития кристаллизационных, усадочных и ликвационных дефектов многие

исследователи применяют различные методы физического воздействия на затвердевающий расплав.

Современные разработки свидетельствуют о том, что даже материалы с одинаковыми размерами зерна могут различаться по свойствам, если они получены разными способами. Поэтому не безразлично, с помощью каких средств будет достигнуто получение качественной металлопродукции. При выборе технологии в каждом конкретном случае следует исходить прежде всего из ее экономичности, эффективности и экологических норм [2].

Электрогидроимпульсное воздействие (ЭГИВ)

Влияние ЭГИВ на расплав основывается на создании периодического импульса в электро-разрядном генераторе упругих колебаний (ЭРГУК) и его передаче через гибкую мембрану в формирующуюся заготовку.

При проведении испытаний ЭРГУК находился в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), его верхний ряд был расположен в 750 мм от нижнего среза кристаллизатора. По мнению авторов ра-

боты [3], ЭГИВ подвергается металл, находящийся в нижней части кристаллизатора. ЭГИВ приводит к интенсификации движения потоков в кристаллизаторе, что повышает теплоотдачу от расплава к фронту затвердевания. В результате проведенных испытаний ЭГИВ было получено снижение осевой пористости и уменьшение длины жидкой фазы на 11 %.

Газоимпульсное перемешивание (ГИП)

Сущность ГИП — это возбуждение скоростных затопленных потоков расплавленного металла, способствующих подводу к мениску более подогретого металла и ускорению процесса затвердевания. Это достигается дискретно-импульсным подводом энергии к расплаву за счет циклического вакуумного всасывания и последующего выталкивания из погруженной в жидкую фазу огнеупорной трубы порций металла. Результаты исследований опытного металла из низкоуглеродистых, низколегированных и нержавеющих сталей, подвергшегося ГИП, выявили, что данный вид воздействия позволяет интенсивнее вести охлаждение затвердевающего расплава. В результате экспериментов установлено, что полное время затвердевания опытных заготовок сократилось на 8–10 %, плотность металла повысилась на 5–8 %, осевая ликвация была менее развита, а осевая рыхлость снизилась на

1,0–1,5 балла, протяженность двухфазной зоны в центре заготовок сократилась с 5 до 3 м, протяженность зоны столбчатых дендритов уменьшилась на 25–30 %, первичное зерно измельчилось в 2–3 раза [4].

Дальнейшие исследования этого вида воздействия показали, что при оптимальном режиме ГИП жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ благоприятно изменяются форма, размер, количество и распределение неметаллических включений, что значительно снизило брак заготовок и проката по трещинам, расслою, осевой неоднородности, неметаллическим включениям и повысило уровень механических свойств сталей ответственного назначения [5].

Из-за сложности применения технологии ЭГИВ и ГИП в настоящее время не нашли широкого применения.

Ввод модификаторов, инокуляторов

В работе [6] среди статических методов физического воздействия (ввод в кристаллизатор холодильников, модификаторов, подогрев зеркала металла) на кристаллизующийся слиток признан перспективным ввод через мениск металла в кристаллизатор модификаторов, инокуляторов. По мнению авторов, при этом изменяется вид, форма и характер неметаллических включений, что приводит к улучшению механических и технологических свойств стали.

Модификаторы первого рода являются инокуляторами — это тугоплавкие элементы и их соединения, способные стать зародышевой фазой, превратиться в центры кристаллизации. К этим элементам относятся ванадий, ниобий, титан и бор. При вводе этих элементов в процессе затвердевания стали образуются карбонитриды этих элементов, выступающие в качестве центров кристаллизации. По мнению разработчиков, в сталь достаточно ввести 0,03–0,12 % V или 0,02–0,05 % Nb для повышения прочности, хла-

достойности, снижения абразивного износа в результате измельчения зерна и упрочнения дисперсными карбонитридами.

Модификаторы второго рода — ингибиторы представлены поверхностно-активными примесями, ограничивающими рост кристаллов (зерен). Они имеют ограниченную растворимость в жидкой фазе. К таким примесям относятся щелочноземельные элементы — кальций, магний, барий.

Редкоземельные металлы, например церий и лантан, являются переходными элементами по влиянию на структуру металла, обладающими свойствами как инокуляторов, так и ингибиторов.

Лучшие результаты по усвоению жидким металлом и влиянию на служебные свойства стали получаются при совместном применении хотя бы по одному элементу из каждой группы модификаторов, например, ванадия или ниобия совместно с кальцием — комбинированных модификаторов. Такие модификаторы могут также включать в себя модификаторы первого рода — инокуляторы и переходные модификаторы (редкоземельные металлы) [6].

В работе [7] установлено, что позднее микролегирование стали в процессе затвердевания НЛЗ позволяет повысить эффективность модифицирования и степень усвоения присадок. Например, оптимальные присадки редкоземельных элементов (РЗЭ) в составе цериевой лигатуры, обеспечивающие соотношение $P3Э/[S] = 3$, приводят к изменению природы и распределению неметаллических включений. Они позволяют на 3–10 % повысить пластичность, на 30 % — ударную вязкость металла в поперечном направлении прокатки, а также существенно увеличить изотропность свойств при отрицательных температурах. В случае ввода иттриевой лигатуры уже при $P3Э/[S] = 2$ достигается повышение прочностных свойств на 6–22 МПа, а ударная вязкость в поперечном направлении прокатки при отрицательных температурах повышается на 30–60 %.

Ввод модификаторов при помощи порошковой проволоки ограничивает тепловой поток на реагент в начале обработки, предотвращает его взаимодействие с расплавом в верхних слоях

металла, способствуя плавлению реагента в нижних горизонтах жидкого металла, что увеличивает время контакта и позволяет более эффективно использовать элементы, имеющие низкие температуры плавления, кипения и малую растворимость в металле. Порошковую проволоку можно вводить не только в ковш, но и в промежуточный ковш МНЛЗ и даже в кристаллизатор МНЛЗ. Итальянские исследователи разработали технологию FAST (forced acceleration of solidification technology — процесс ускоренной принудительной кристаллизации), которая позволяет улучшить качество металла и поверхности НЛЗ. Основываясь на этих исследованиях, фирма Terni Acciai Speciali, Италия, на заводе в г. Терни смонтировала оригинальную установку по вводу порошковой проволоки через стопор промежуточного ковша МНЛЗ в струю металла между промежуточным ковшом и кристаллизатором МНЛЗ [8, 9].

Введение в кристаллизатор алюминия при разливке электротехнических сталей с высоким содержанием алюминия и кремния позволяет уменьшить зарастание погружного стакана глиноземистыми включениями. Ввод титана при разливке коррозионностойких сталей в кристаллизатор способствует максимальному усвоению и уменьшению образования оксидов и нитридов титана. Процесс FAST можно применять также при отливке заготовок из автоматной стали, легированной алюминием, свинцом, бором и другими элементами [8].

На заводе фирмы Italsider, Италия, в г. Таранто была разработана и внедрена в производство технология обработки стали в промежуточном ковше МНЛЗ порошковой проволокой. Специалистами этой фирмы разработана конструкция направляющей трубы, с помощью которой порошковая проволока вводилась в виде витков в промежуточный ковш. Расстояние между витками и их диаметр выбирались в зависимости от глубины ванны металла и температуры стали [8, 9].

В проведенных исследованиях отсутствует информация о возможном дополнительном загрязнении расплава неметаллическими включениями.

Ввод расходуемых холодильников

Ввод расходуемых холодильников в расплав через мениск кристаллизатора в виде ленты, металлических порошков, гранул или дробы из стали того же состава, что и разливаемый металл, в зависимости от фракции и их количества создает благоприятные условия для локального возникновения центров кристаллизации. Введенные в жидкий металл экзогенные центры кристаллизации снимают его перегрев, уменьшают

время общего затвердевания, становятся новыми центрами кристаллизации и улучшают макроструктуру получаемых заготовок [10, 11].

В работе [12] рассматривается реализованная на практике промышленная технология непрерывной разливки углеродистых сталей с введением в расплав сплава-микрохолодильника. Гранулы того же химического состава, что и разливаемая сталь, вводятся непосредственно в

кристаллизатор сечением 270×240 мм (или одновременно в несколько кристаллизаторов соответственно числу ручьев МНЛЗ). Сплав-микрохолодильник вводится в расплав сверху, ссыпаясь со специальных транспортеров на зеркало расплава, покрытое слоем шлака. По данным исследователей, введенные холодильники обеспечивают дисперсность кристаллической структуры НЛЗ, снижение степени ликвации химических элементов как в осевой зоне, так и по всему сечению заготовок.

В работе [13] указано, что ввод в кристаллизатор стальной ленты в качестве расходоуемых холодильников при непрерывной разливке позволил получить структуру литой заготовки, приближенную к катаной.

По данным работы [14], при вводе в кристаллизатор сечением 220×1000 мм стальной полосы размером 100×3 мм со скоростью 3,6 м/мин тем-

пература перегрева расплава уменьшается на 5 °С, а металлургическая длина — на 2,9 м, при введении такой же полосы со скоростью 6 м/мин — на 9 °С и 3,7 м соответственно.

Недостатком данной технологии является загрязнение макроструктуры заготовок экзогенными шлаковыми и эндогенными неметаллическими включениями.

С целью уменьшения загрязнения заготовок экзогенными неметаллическими включениями была разработана технология введения в кристаллизатор вибрирующих холодильников. Наложенная на холодильник частота исключает намораживание жидкой шлакообразующей смеси и затягивание ее в слиток, при этом существенно улучшается качество макроструктуры заготовок широкого марочного и размерного сортов

Вибрация

По мнению ряда исследователей [16–18], наложение вибрации является эффективным способом для интенсификации гидродинамических процессов, происходящих в жидкой лунке НЛЗ, что, в свою очередь, приводит к усилению теплообменных процессов в кристаллизаторе и ЗВО при формировании заготовок. Благодаря простоте конструкции, эксплуатации и обслуживания, а также низкой стоимости вибрация открывает большие возможности для ее широкого применения на промышленных предприятиях. В кристаллизаторе наложение вибрации возможно как посредством охлаждаемого холодильника, введенного в расплав, так и через стенки кристаллизатора при помощи специальных излучателей, создающих колебания с частотой 20–35 кГц [19].

В работе [20] описаны результаты применения воздействия вибрации в ЗВО при непрерывном литье блюмовых заготовок. Вибратор, фор-

мирующий колебания амплитудой 1,5 мм и частотой до 1000 мин⁻¹, был размещен на стойках опорных роликов ЗВО со стороны малого радиуса на расстоянии 0,3–0,5 м от нижнего среза кристаллизатора. В соответствии с приведенными данными применение вибрационного воздействия в ЗВО совместно с ГИП в кристаллизаторе дает повышение плотности, снижение анизотропии свойств по сечению заготовки.

В работе [21] было изучено влияние вибрации на формирование полунепрерывнолитых заготовок из алюминиевых сплавов. В опытных образцах было отмечено более равномерное распределение эвтектической составляющей и неметаллических включений, а также повышение плотности металла.

В настоящее время из-за сложности применения вибрация не нашла широкого распространения при непрерывном литье сортовых и блюмовых заготовок.

Ультразвуковое воздействие

По мнению авторов работы [19], воздействие ультразвука (УЗ) на вводимую в металл ленту, которая снижает перегрев металла в кристаллизаторе, вызывает ее дробление и образование в жидком металле центров кристаллизации. Было отмечено, что УЗ колебания, вводимые в расплав, интенсифицируют процесс дегазации, способствуют дополнительному перемешиванию, препятствуют возникновению дендритной ликвации и концентрации неметаллических включений на границах зерен. Все это положительно влияет на формирование однородной структуры металла в процессе кристаллизации.

На основании проведенных исследований структуры, физико-механических испытаний и сравнительного анализа технологических процессов [22, 23] можно утверждать, что:

– УЗ обработка расплава при его кристаллизации приводит к измельчению зерна, разрушению и удалению неметаллических включений, что отражается в виде увеличения пластичности металла;

– использование заготовок, подвергнутых воздействию УЗ, стабилизирует протекание процессов волочения, скрутки и уплотнения, повышает выход годного, сокращает эксплуатацион-

ные затраты, связанные с повторным проведением отдельных технологических операций;

– готовая продукция из заготовок, полученных с применением УЗ, имеет однородную структуру по всей длине и обладает повышенной пластичностью.

Вероятно, это связано с тем, что при наложении УЗ происходит дополнительное перемешивание расплава перед фронтом кристаллизации

и, как следствие, уменьшение градиента температуры по сечению слитка, что в целом способствует еще большей неравновесности процесса кристаллизации.

В настоящий момент УЗ воздействие на кристаллизующейся слиток применяется на уровне экспериментов, но пока, к сожалению, не нашло промышленного применения.

“Мягкое” обжатие

Технология “мягкого” обжатия (МО) наиболее эффективно используется при литье заготовок большого сечения из высоколегированных и высокоуглеродистых сталей с целью снижения осевой пористости и ликвации.

При затвердевании заготовок особенно из сталей, имеющих широкий интервал кристаллизации, при содержании жидкой фазы в двухфазной зоне в пределах 30–70 % появляются перемычки, которые препятствуют попаданию маточного расплава в зону окончательного затвердевания, что приводит к появлению пустот по оси заготовки и образованию осевой пористости. При этом в образующиеся пустоты из междендритных пространств проникает расплав, обогащенный ликвирующими элементами, что приводит к образованию осевой ликвации.

МО реализуется в процессе непрерывной разливки путем наложения избыточного давления в обжимающих клетях, расположенных последовательно по длине непрерывнолитого слитка в зоне его окончательного затвердевания.

В момент наложения обжатия из-за роста гидродинамического (ферростатического) давления жидкая сердцевина с ликвирующими элементами вытесняется из зоны окончательной кристаллизации, что приводит к уменьшению осевой ликвации. В свою очередь, при обжатии компенсируется усадка металла при затвердевании и разрушаются перемычки, не позволяющие жидкому металлу проникать в зону окончательного затвердевания, что в результате снижает центральную пористость.

Важное значение имеет место приложения обжатия. Для этого необходимо знать точку окончательного затвердевания НЛЗ. Если МО будет приложено раньше, чем нужно, то на фронте кристаллизации могут возникнуть растягивающие напряжения, которые приведут к возникновению внутренних трещин. Если обжатие приложено поздно и сердцевина слитка уже затвердела, то в слитке устраняется лишь пористость, а ликвация не снижается.

Применение МО освещено в целом ряде работ [24–27]. Например, при разливке заготовок сечением 150×150 мм [28] из стали 5сп при обжатии 2,5 мм в тянуще-правильной машине средний балл по центральной пористости снизился с 2,0 до 0, а осевой ликвации — с 2,5 до 0,5. Средний балл по осевым трещинам остался неизменным. Также положительные результаты были получены при литье заготовок сечением 150×150 и 180×180 мм из высокоуглеродистых сталей [29, 30].

При разливке заготовок 300×340 мм из рельсовых сталей с применением семиклетевой системы МО были получены заготовки с тонкой микроструктурой и малой центральной пористостью [31].

Следует отметить, что в настоящее время из-за высокой стоимости внедрения, сложности настройки и эксплуатации технология МО не нашла широкого применения при непрерывном литье сортовых и блюмовых заготовок, однако достаточно широко распространена при производстве высококачественных слябов [32–35].

Электромагнитное перемешивание (ЭМП)

По мнению авторов, наиболее эффективным способом активного вмешательства в процесс кристаллизации непрерывного слитка непосредственно по ходу разливки с гарантированной возможностью управления процессом структурообразования является метод ЭМП жидкой лунки непрерывного слитка.

В настоящее время в мировой практике ЭМП жидкого металла на МНЛЗ стало неотъемлемой частью прогрессивной технологии получения высококачественных заготовок [36–39]. В резуль-

тате рост требований к качеству продукции и развитие эффективных методов и средств электромагнитной обработки расплавов привели к тому, что в контрактные требования к качеству НЛЗ вносятся положения об обязательном использовании ЭМП при производстве продукции из высококачественных сталей.

При ЭМП происходит перемешивание жидкой фазы кристаллизующегося слитка посредством электромагнитных сил, которые возникают при

взаимодействии магнитного поля с электрическим током.

В зависимости от сечения НЛЗ и требований к макроструктуре системы ЭМП могут располагаться в кристаллизаторе (MEMS), в ЗВО (SEMS) или в зоне окончания затвердевания (FEMS). При разливке высокоуглеродистых, трубных и других сталей ответственного назначения, особенно в заготовки большого сечения, возможно одновременное применение ЭМП на трех, а иногда и на четырех уровнях. Число устройств ЭМП и место их установки определяются для каждой конкретной МНЛЗ исходя из ее конструктивных особенностей, марочного сортамента разливаемых сталей, сечения отливаемой заготовки и технологических параметров разлики.

В настоящее время системы ЭМП жидкой фазы кристаллизующегося слитка нашли широкое применение. Системами ЭМП в кристаллизаторе в России оснащены сортовые и блюмовые МНЛЗ металлургических комбинатов — Магнитогорского, «Северсталь», ЕВРАЗ ЗСМК, Челябинского, «Уральская сталь» и Оскольского электрометаллургического комбинатов, а также Волжского и Северского трубных, Первоуральского новотрубного, Таганрогского, «УГМК-Сталь», Нижнесергинского метизного и Омутнинского металлургических заводов. МНЛЗ металлургического завода «Ижсталь» и МПНЛЗ завода «Электросталь» оснащены системами ЭМП на двух уровнях — в кристаллизаторе и ЗВО.

Применение ЭМП показало, что максимальное влияние на качество поверхности и макроструктуры НЛЗ оказывает ЭМП в кристаллизаторе. Большинство зарубежных производителей таких устройств в основном предлагают системы ЭМП с наружным расположением статора. В этом случае внешний статор ЭМП снаружи охватывает корпус кристаллизатора, при этом корпуса статоров и кристаллизаторов выполняются из немагнитной стали аустенитного класса.

Одним из основных преимуществ применения статоров ЭМП наружного исполнения является минимальное требуемое количество таких статоров, которое соответствует числу ручьев МНЛЗ. Однако такая компоновка обладает рядом недостатков. Например, внешнее расположение индуктора ЭМП приводит к существенному увеличению межполюсного расстояния магнитной системы и, следовательно, к увеличению габаритов статора, его массы и, как следствие этого, к возрастанию нагрузки на механизм качения, если статор установлен на его качающуюся раму. Увеличение расстояния между полюсами, в свою очередь, приводит к снижению величины индукции и, соответственно, к уменьшению скорости движения расплава. При внешнем расположении статора требуется отдельный

контур охлаждения специально подготовленной водой, что существенно увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты. Ухудшение качества охлаждающей воды часто бывает причиной выхода из строя систем ЭМП данного типа.

Необходимо также отметить, что применение унифицированных систем ЭМП, расположенных вне корпуса кристаллизатора, в ряде случаев, когда меньший формат отливаемых заготовок существенно отличается от большего, нивелирует эффект от ЭМП при разливке заготовок минимального сечения в связи с удаленностью индуктора от заготовки.

ВНИИМЕТМАШ занимается разработками систем ЭМП для МНЛЗ с 70-х годов прошлого века и накопил значительный опыт в этой области. ВНИИМЕТМАШ готов разрабатывать и поставлять комплектные системы ЭМП со статорами наружного исполнения. Однако, по мнению авторов, для ЭМП в кристаллизаторах МНЛЗ, отливающих сортовые, блюмовые и круглые заготовки, более эффективной является встроенная система ЭМП. В основу концепции положен принцип максимально возможного приближения полюсов статора к жидкой фазе слитка для достижения высокой скорости перемешивания при низкой потребляемой мощности. Это достигается главным образом за счет того, что ЭМП устройство, создающее вращающее магнитное поле, встроено в корпус кристаллизатора. Отличительной особенностью конструкции разработанных ВНИИМЕТМАШ кристаллизаторов-ЭМП является то, что охлаждение катушек полюсов статора, как наружного, так и встроенного исполнения, осуществляется водой, предназначенной для охлаждения медных рабочих стенок кристаллизатора. В этом случае не требуется отдельного дополнительного контура охлаждения и специальной дорогостоящей подготовки воды, охлаждающей статор. При этом статор и корпус кристаллизатора проектируются на максимальный размер заготовки. При переходе на меньший размер заготовки требуется извлечь гильзу и обечайку одного размера и затем установить и закрепить снизу и сверху фланцами гильзу и обечайку меньшего размера. Данная компоновка системы ЭМП в кристаллизаторе позволяет в 2–4 раза уменьшить расход потребляемой электроэнергии при одинаковом воздействии по сравнению с внешним расположением индуктора.

Металлографическое исследование показало [40], что применение ЭМП в кристаллизаторе МНЛЗ влияет на качество поверхности и макроструктуры сортовых заготовок из высокоуглеродистых сталей, при этом (рис. 1):

– улучшается качество поверхности и подповерхностного слоя;

- снижается зональная и осевая ликвация;
- снижается коэффициент ликвации углерода;
- достигается протяженность мартенситных участков в прокате не более 20 мкм;
- снижается максимальный балл по центральной пористости с 4,0 до 2,5.

Без ЭМП

С ЭМП

Рис. 1. Макроструктура поперечных темплетов сортовых непрерывнолитых заготовок из высокоуглеродистых сталей, отлитых с ЭМП конструкции ВНИИМЕТМАШ, и контрольных

Fig. 1. Macrostructure of cross-section templates of CC long product billet, casted of high-carbon steel using VNIMETMASH EMS (Electro-magnetic stirring) facility, and check ones

Анализ макроструктуры круглых заготовок diam. 250 мм и проката и из них показал [41], что

применение ЭМП в кристаллизаторе (рис. 2) высокоэффективно и экономично, так как обеспечивает достижение положительных металлургических результатов при минимальных затратах. Например, снижается балл по центральной пористости и осевой ликвации с 1,5–2,5 до 0,5–1,0, балл по осевым трещинам — с 1,5–2,0 до 0,5–1,0, а краевые точечные загрязнения (КТЗ) при применении ЭМП полностью отсутствуют, учитывая, что без ЭМП балл по КТЗ составляет 2–3.

Без ЭМП

ЭМП в кристаллизаторе

Рис. 2. Макроструктура поперечных темплетов круглых непрерывнолитых заготовок из нержавеющей сталей, отлитых с ЭМП, и контрольных

Fig. 2. Macrostructure of cross-section templates of CC round billet, casted of stainless steel using EMS (Electro-magnetic stirring) facility, and check ones

Выводы

1. Для устранения ряда дефектов макроструктуры НЛЗ, связанных с процессом кристаллизации, усадочными и ликвационными явлениями, которые не могут быть полностью устранены даже при оптимальных конструктивных особенностях оборудования МНЛЗ и рациональных технологических параметрах процесса непрерывного литья, необходимо дополнительное применение методов физического воздействия на процесс затвердевания жидкой стали. Применяемый способ зависит от технологии непрерывной разливки и существующего оборудования МНЛЗ.

2. По мнению авторов, ЭМП является наиболее эффективным способом активного вмешательства в процесс кристаллизации непрерывного слитка непосредственно по ходу разливки с гарантированной возможностью управления процессом структурообразования.

3. Для достижения оптимальных результатов по качеству макроструктуры и поверхности НЛЗ, особенно большого сечения из сталей с широким интервалом кристаллизации, часто требуется применение комплексного воздействия, например, ЭМП в кристаллизаторе и МО или ЭМП на двух уровнях — в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World steel in figures. World Steel Association 2017. — 17 с.
2. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок. — Магнитогорск: изд-во МГТУ, 2014. — 348 с.
3. Герасименко В.Г., Синегин Е.В., Чмырков К.Ф. Формирование непрерывнолитой заготовки при электрогидроимпульсном воздействии // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 7. С. 124–126.
4. Баранова В.Н., Якобше Р.Я., Найдек В.Л. Влияние газоимпульсного перемешивания жидкого металла на качество слитков и непрерывнолитых слябов // Процессы литья. 2010. № 6 (84). С. 20–26.

5. Баранова В.Н., Якобше Р.Я., Найдек В.Л. Влияние газоимпульсного перемешивания на загрязненность металла неметаллическими включениями // Процессы литья. 2011. № 3 (87). С. 9–14.
6. Столяров А.М., Сомнат Б., Потапова М.В., Дидович С.В. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки // Вестник МГТУ им. Носова. 2014. № 1. С. 24–27.
7. Титова Т.М. О целесообразности позднего микролегирования стали в процессе формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ // Металл и литье Украины. 2009. № 3. С. 16–19.
8. Жучков В.И., Шепуков О.Ю., Лозовая Е.Ю., Марпук Л.А. Современные методы ввода модификаторов в расплавы чугуна и стали: сб. докладов Литейного консалиума № 1 “Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей”. — Челябинск: Челябинский Дом печати, 2006. С. 52–62.
9. Spaccarotella A., Ferretti A., Liberati L., Moretti R. New methods of alloying steel in continuous casting // Commission of the European Communities technical steel research, Report EUR 10130 EN. 1986. P. 74.
10. Вайнер Н.И., Тутарова В.Д. Моделирование теплообмена при непрерывной разливке стали с применением внутренних охладителей // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2008. № 4. С. 126–131.
11. Пат. 2407606 РФ, МПК В 22 D 11/108. Способ получения непрерывнолитой заготовки повышенного качества / А.А. Киричков, С.Ю. Макушев, О.В. Травин, Н.М. Александрова, Е.Х. Шахпазов, Ю.П. Петренко, П.В. Эккерт, И.Б. Чудаков, А.В. Кушнарев // Заявл. 01.12.2009; опубл. 27.12.2010. Бюл. № 36.
12. Ardelean M., Ardelean E., Socalici A., Hreput T. Experimental equipment for the introduction of microholograms in the tundish and the mould installation for the continuous casting of steel // Annales of the Oradea University. 2008. Vol. 39. № 3. P. 1190–1195.
13. Носоченко О.В., Ленский В.Г. Совершенствование технологии непрерывной разливки стали в крупногабаритные слябы для дальнейшей прокатки на тонкий лист и плиты // Plynuli adlevanio celi – X. Mezinardni hitnicka conference, Trjinec, Rijen. 1989. С. 360–367.
14. Shen M.G., Zang Z.S., Shu K.P. Mathematics simulation and experiments of continuous casting with strip feeding in mold // Metalurgija. 2017. Vol. 56. № 3–4. P. 315–318.
15. Голенков М.Б. Непрерывная разливка с вводом вибрирующих расходуемых макроохладителей как способ повышения качества макроструктуры заготовок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2013. № 10. С. 38–40.
16. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Ноговицын А.В., Таранов Е.Д. Формирование непрерывнолитой заготовки под воздействием вибрации // Современные огнеупоры и эффективность их применения при производстве и разливке стали: сб. научн. тр. — Донецк: ДонНТУ, 2013. — 200 с.
17. Куценко А.И., Селянин И.Ф., Хамитов Р.М., Морин С.В. Влияние вибрации формы на тепловые процессы охлаждения отливки // Ползуновский вестник. 2005. № 2 (ч. 2). С. 167–169.
18. Zhong Z., Zitian F., Xuanpu D. etc. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy // China foundry. 2010. Vol. 7. № 1. P. 24–29.
19. Голенков М.А. Непрерывная разливка с вводом вибрирующих расходуемых макроохладителей как способ повышения качества макроструктуры заготовок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2013. № 10. С. 38–40.
20. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Баранова В.Н. Некоторые аспекты применения внешних воздействий при непрерывной разливке стали // Сталь. 2015. № 10. С. 17–20.
21. Таранов Е.Д., Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С. Формирование полунепрерывнолитых алюминиевых заготовок в условиях физического воздействия на расплав // Литье-2011: Материалы VII Междунар. научно-практич. конф. С. 186, 187.
22. Грот А.Н., Красильников Д.Н., Рассохин В.А. и др. Влияние ультразвуковой обработки расплава на структуру и свойства катанки из сплавов цветных металлов // Металлург. 2012. № 10. С. 78–82.
23. Белов В.Д., Герасименко Е.А., Гусева В.В., Коновалов А.Н. Влияние условий затвердевания заготовок из оловянистой бронзы BrO10C2H3 на ее структуру // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 26–33.
24. Rogberg B. Influence of Soft Reduction on the Liquid Flow Velocity and Pore Formation in the Mushy Zone // The 2nd ISIJ-VDEh-Jernkontoret Joint Symposium 12–13 June, 2017 Stockholm, Sweden. P. 187–195.
25. Смирнов Е.Н., Ручко В.Н., Демченко Д.О. Анализ существующих технологических решений и разработка варианта способа “мягкого” обжата непрерывнолитых сортовых заготовок // Обработка материалов давлением. 2012. № 1 (30). С. 195–201.
26. Маточкин В.А., Терлецкий С.В., Марупкевич В.Э. Системы мягкого обжата на машинах непрерывной разливки стали и их влияние на качество макроструктуры заготовок // Литье и металлургия. 2010. № 1 (54). С. 201–203.
27. Morsut L., Rinaldi M., Urbano A., Marco L. Rail steel production at Evraz ZSMK with MSR // Proceedings of 8th European Continuous Casting Conf., 23–26 June 2014, Graz, Austria. P. 416–425.
28. Куберский С.В., Стриченко С.М., Завгородний А.В. Экспериментальные исследования процессов мягкого обжата непрерывнолитых сортовых заготовок в промышленных условиях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 4/7 (52). С. 41–43.
29. Thome R., Harste K. Principles of Billet Soft-reduction and Consequences for Continuous Casting // ISIJ International. 2006. Vol. 46. № 12. P. 1839–1844.
30. Thome R., Ralf T., Ostheimer V. etc. Soft reduction in the continuous casting of billets // Millennium steel. 2007. P. 112–118.
31. Морсют Л., Ринальдини М., Урбано А., Лена М. Производство высококачественных рельсов на заводе ОАО “ЕВРАЗ ЗСМК” в Новокузнецке // Металлургическое производство и технология. 2014. № 2. С. 36–42.
32. Мошкунев В.В., Столяров А.М. Сущность метода мягкого обжата слябовой непрерывнолитой заготовки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 12. С. 59–65.
33. Мошкунев В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Мягкое обжатие непрерывнолитых слябов толщиной 300 мм в ККЦ ММК // Вестник МГТУ им. Носова. 2011. № 11. С. 41–45.

34. El-Bealy M.O. Macrosegregation Quality Criteria and Mechanical Soft Reduction for Central Quality Problems in Continuous Casting of Steel // *Materials Sciences and Applications*. 2014. № 5. P. 724–744.
35. Domitner J., Wu M., Mayer F. etc. Modeling the Formation and the Reduction of Macrosegregation in Continuously Cast Steel Slabs // *Proceedings of 7th European Continuous Casting Conf. Dusseldorf, 27 June – 1 July 2011*.
36. Grundy A.N., Yeke M., Feldhaus S. Design and first operational results from 5 strand billet, bloom and beam blank combicaster at Kardemir, Turkey // *Proceedings of 8th European Continuous Casting Conference, 23–26 June 2014, Graz, Austria*. P. 406–415.
37. Dwivedi S.P., Sharma S. Electromagnetic Stir Casting and its Process Parameters for the Fabrication and Refined the Grain Structure of Metal Matrix Composites – A Review // *International Journal of Advance Research and Innovation*. 2014. Vol. 2. № 3. P. 639–649.
38. Toh T., Hasegawa H., Harada H. Evaluation of Multiphase Phenomena in Mold Pool under In-mold Electromagnetic Stirring in Steel Continuous Casting // *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. № 10. P. 1245–1251.
39. Stransky R., Kavicka F., Sekanina B., Stetina J. The effect of electromagnetic stirring on the crystallization of CONCAST billets // *Materiali in tehnologije / Materials and technology*. 2011. № 45 (2). P. 163–166.
40. Смоляков А.С., Шахов С.И., Рогачиков Ю.М. Системы электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок // *Тяжелое машиностроение*. 2017. № 5. С. 7–11.
41. Грачёв В.Г., Сивак Б.А., Смоляков А.С., Шахов С.И. Современные электромагнитные перемешиватели жидкой стали в кристаллизаторе и ЗВО на бломовой МНЛЗ // *Тяжелое машиностроение*. 2011. № 2. С. 18–22.

MODERNIZATION OF CONINUOUS CASTING MACHINES WITH THE PURPOSE OF INCREASING OF FINISHED PRODUCT QUALITY

S. I. SHAKHOV¹, PhD (Tech), Leading Research Associate, omnlm@vniimetmash.ru; D. S. SHAKHOV²
(¹ JSC AKHK “VNIIMETMASH after Academician A.I. Tselikov”, Russia, Moscow;
² National Research University “MEI”, Russia, Moscow)

Abstract. To prevent formation or suppress development of crystallization, shrink and liquating defects different methods of physical impact on setting melt are used. For technology selection in every case economy, efficiency and ecological norms should be considered first of all.

Methods of physical impact on crystallizable billet considered: electro-hydro impulse impact, gas-impulse stirring, modifier input, inoculator input, consumable coolers input, ultrasonic impact, “soft” reduction, electromagnetic stirring (EMS).

Due to authors’ opinion, EMS of liquid portion of a CC billet is the most effective method of active impact on crystallization process of a CC billet directly during casting resulted in a guarantee possibility to control the process of structure formation. At present in world practice the EMS of liquid metal at CC machines became an integral part of advanced technology of high quality billets obtaining. The requirements increase to products quality and development of effective methods and means of melts electromagnetic processing resulted in a requirement of obligatory EMS usage when producing products of high quality steels.

It was shown, that for a number of CC bullet macrostructure defects, arising from crystallization process, shrinkage and liquating phenomena, which can not be eliminated completely even at optimal CC machines design features and rational technology parameters of CC process, additional methods of physical impact on the liquid metal setting needed. The method to be used depends on the CC technology and existing CC machines equipment.

Key words: steel continuous casting; crystallizable billet; methods of physical impact; macrostructure defects elimination.

For citation: Shakhov S.I., Shakhov D.S. Modernization of continuous casting machines with the purpose of increasing of finished product quality. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018. No. 10, pp. 50–60. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-10-50-60

REFERENCES

1. World steel in figures. World Steel Association 2017, 17 p.
2. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. *Nepreryvnyaya razlivka stali. Gidromekhanika mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Continuous casting of steel. Hydromechanics of CC machines]. Magnitogorsk: izdatel'stvo MGTU, 2014, 348 p. (In Russ.).
3. Gerasimenko V.G., Sinegin E.V., Chmyrkov K.F. Forming of CC billet at electro-hydro impulse impact. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2012, no. 7, pp. 124–126. (In Russ.).
4. Baranova V.N., Yakobshe R.Ya., Naidek V.L. Influence of gas-impulse liquid metal stirring on quality of billets and CC slabs. *Protsessy lit'ya*, 2010, no. 6 (84), pp. 20–26. (In Russ.).
5. Baranova V.N., Yakobshe R.Ya., Najdek V.L. Influence of gas-impulse stirring on contamination of metal by non-metallic inclusions. *Protsessy lit'ya*, 2011, no. 3 (87), pp. 9–14. (In Russ.).
6. Stolyarov A.M., Somnat B., Potapova M.V., Didovich S.V. About methods of impact on steel CC billet forming process. *Vestnik MGTU im. Nosova*, 2014, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.).
7. Titova T.M. About advisability of late steel micro alloying in the process of CC billet forming in a CC machine mold. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2009, no. 3, pp. 16–19. (In Russ.).
8. Zhuchkov V.I., Sheshukov O.Yu., Lozovaya E.Yu., Marshuk L.A. *Sovremennye metody vvoda modifikatorov v rasplavy chuguna i stali* [State-of-the-art methods of modifiers input into hot metal and steel melts]. *Sb. dokladov Liteinogo konsiliuma № 1 “Modifitsirovanie kak effektivnyi metod povysheniya kachestva chugunov i stali”* [Proc. Foundry Council

- No. 1 "Modification as an Effective Method for Improving the Quality of Cast Iron and Steel"]. Chelyabinsk: Chelyabinskii Dom pečati, 2006, pp. 52–62. (In Russ.).
9. Spaccarotella A., Ferretti A., Liberati L., Moretti R. New methods of alloying steel in continuous casting. *Commission of the European Communities technical steel research, Report EUR 10130 EN*, 1986, p. 74.
 10. Vainer N.I., Tutarova V.D. Simulation of heat exchange at steel continuous casting while using internal coolers. *Izvestiya VUZov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki. Mashinostroenie i mashinovedenie*, 2008, no. 4, pp. 126–131. (In Russ.).
 11. Kirichkov A.A., Makushev S.Yu., Travin O.V., Aleksandrova N.M., Shakhpazov E.Kh., Petrenko Yu.P., Ekkert P.V., Chudakov I.B., Kushnarev A.V. *Sposob polucheniya nepreryvnoi zagotovki povyshennogo kachestva* [A method of obtaining increased quality CC billet]. Patent RF no. 2407606. IPC B 22 D 11/108. *Byulleten' izobretenii*, 2010, no. 36. (In Russ.).
 12. Ardelean M., Ardelean E., Socalici A., Heput T. Experimental equipment for the introduction of microholograms in the tundish and the mould installation for the continuous casting of steel. *Annales of the Oradea University*, 2008, vol. 39, no. 3, pp. 1190–1195.
 13. Nosochenko O.V., Lenskii V.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii nepreryvnoi razlivki stali v krupnogabaritnye slyaby dlya dal'neishei prokatki na tonkii list i plitu* [Improving of the technology of steel continuous casting into large-dimension slabs for further rolling into sheet and plate]. *Plynuli adlevanio celi – X. Mezinardni hitnicka conference, Trjinec, Rijen*. 1989, pp. 360–367.
 14. Shen M.G., Zang Z.S., Shu K.P. Mathematics simulation and experiments of continuous casting with strip feeding in mold. *Metallurgij*, 2017, vol. 56, no. 3–4, pp. 315–318.
 15. Golenkov M.B. Continuous casting with input of consumable macro coolers as a method to increase billet macrostructure quality. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2013, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
 16. Nuradinov A.S., El'darkhanov A.S., Nogovitsyn A.V., Taranov E.D. *Formirovanie nepreryvnoi zagotovki pod vozdeistviem vibratsii* [Formation of continuously casted billet under vibration impact]. *Sovremennye ogneupory i effektivnost' ikh primeneniya pri proizvodstve i razlivke stali: sb. nauchn. tr.* [Modern refractories and the effectiveness of their use in the manufacture and pouring of steel: a collection of scientific papers]. Donetsk: DonNTU, 2013, 200 p. (In Russ.).
 17. Kutsenko A.I., Selyanin I.F., Khamitov R.M., Morin S.V. Influence of form vibration on heat processes of a ingot cooling. *Polzunovskii vestnik*, 2005, no. 2 (ch. 2), pp. 167–169. (In Russ.).
 18. Zhong Z., Zitian F., Xuanpu D., Bo T., Di P., Jiqiang L. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy. *China foundry*, 2010, vol. 7, no. 1, pp. 24–29.
 19. Golenkov M.A. Continuous casting with vibrating consumable macro coolers input as a method to increase billet macrostructure quality. *Stal'*, 2013, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
 20. El'darkhanov A.S., Nuradinov A.S., Baranova V.N. Some aspects of external impacts application at steel continuous casting. *Stal'*, 2015, no. 10, pp. 17–20. (In Russ.).
 21. Taranov E.D., El'darkhanov A.S., Nuradinov A.S. *Formirovanie polunepripryvnolitykh alyuminievykh zagotovok v usloviyakh fizicheskogo vozdeistviya na rasplav* [Formation of half-continuous aluminum billets under conditions of physical impact on melt]. *Lit'e-2011: Materialy VII Mezhdunar. nauchno-praktich. konf.* [Casting-2011: Proceedings of the VII Intern. scientific and practical. Conf.]. 2011, p. 186, 187.
 22. Grot A.N., Krasil'nikov D.N., Rassokhin V.A., Tverdiv V.I., Zhikharev P.Yu., Golenkov M.A. Influence of melt ultrasonic processing on structure and properties of wire rod of non-ferrous metals alloys. *Metallurg*, 2012, no. 10, pp. 78–82. (In Russ.).
 23. Belov V.D., Gerasimenko E.A., Guseva V.V., Kononov A.N. Influence of solidification conditions of BrO10S2N3 tinny bronze billet on its structure. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2016, no. 2, pp. 26–33. (In Russ.).
 24. Rogberg B. Influence of Soft Reduction on the Liquid Flow Velocity and Pore Formation in the Mushy Zone. The 2nd ISIJ-VDEH-Jernkontoret Joint Symposium 12–13 June, 2017, Stockholm, Sweden, pp. 187–195.
 25. Smirnov E.N., Ruchko V.N., Demchenko D.O. Analysis of existing technological solutions and development of a "soft" reduction method for continuously casted long products billets. *Obrabotka materialov davleniem*, 2012, no. 1 (30), pp. 195–201. (In Russ.).
 26. Matochkin V.A., Terletskii S.V., Marushkevich V.E. Soft reduction system at steel continuous casting machines and their influence on billets macrostructure quality. *Lit'e i metallurgiya*, 2010, no. 1 (54), pp. 201–203. (In Russ.).
 27. Morsut L., Rinaldi M., Urbano A., Marco L. Rail steel production at Evraz ZSMK with MSR. Proceedings of 8th European Continuous Casting Conf., 23–26 June 2014, Graz, Austria, pp. 416–425.
 28. Kuberskii S.V., Strichenko S.M., Zavgorodnii A.V. Experimental study of soft reduction processes of continuously casted long products billets under industrial conditions. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2011, no. 4/7 (52), pp. 41–43.
 29. Thome R., Harste K. Principles of Billet Soft-reduction and Consequences for Continuous Casting. *ISIJ International*, 2006, vol. 46, no. 12, pp. 1839–1844.
 30. Thome R., Ralf T., Ostheimer V., Ney G., Rüppel F., Girgensohn A., Plociennik U., Schmitz W., Geerkens C., Becker M. Soft reduction in the continuous casting of billets. *Millennium steel*, 2007, pp. 112–118.
 31. Morsut L., Rinaldi M., Urbano A., Lena M. Production of high quality rails at OJSC "EVRAZ ZSMK" plant in Novokuznetsk. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*, 2014, no. 2, pp. 36–42. (In Russ.).
 32. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M. Essence of soft reduction method of continuously casted slab. *Vestnik MGTU im. Nosova*, 2012, no. 12, pp. 59–65. (In Russ.).
 33. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Soft reduction of continuously casted slabs of 300 mm thickness at BOF MMK. *Vestnik MGTU im. Nosova*, 2011, no. 11, pp. 41–45. (In Russ.).
 34. El-Bealy M.O. Macro-segregation Quality Criteria and Mechanical Soft Reduction for Central Quality Problems in Continuous Casting of Steel. *Materials Sciences and Applications*, 2014, no. 5, pp. 724–744.

35. Domitner J., Wu M., Mayer F., Ludwig A., Kaufmann B., Reiter J., Schaden T. Modeling the Formation and the Reduction of Macrosegregation in Continuously Cast Steel Slabs. Proceedings of 7th European Continuous Casting Conf. Dusseldorf, 27 June – 1 July 2011.
36. Grundy A.N., Yeke M., Feldhaus S. Design and first operational results from 5 strand billet, bloom and beam blank combicaster at Kardemir, Turkey. Proceedings of 8th European Continuous Casting Conference, 23–26 June 2014, Graz, Austria, pp. 406–415.
37. Dwivedi S.P., Sharma S. Electromagnetic Stir Casting and its Process Parameters for the Fabrication and Refined the Grain Structure of Metal Matrix Composites – A Review. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 639–649.
38. Toh T., Hasegawa H., Harada H. Evaluation of Multiphase Phenomena in Mold Pool under In-mold Electromagnetic Stirring in Steel Continuous Casting. *ISIJ International*, 2001, vol. 41, no. 10, pp. 1245–1251.
39. Stransky R., Kavicka F., Sekanina B., Stetina J. The effect of electromagnetic stirring on the crystallization of CONCAST billets. *Materials and technology*, 2011, no. 45 (2), pp. 163–166.
40. Smolyakov A.S., Shakhov S.I., Rogachikov Yu.M. Electromagnetic stirring systems for continuous casting machines. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2017, no. 5, pp. 7–11. (In Russ.).
41. Grachev V.G., Sivak B.A., Smolyakov A.S., Shakhov S.I. State-of-the-art liquid steel electromagnetic stirrers in molds and ZVO at a bloom CCM. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2011, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.).