

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.147

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),
Н.В. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук,
В.Ю. ГУНЕНКОВ, **Н.А. ГОДИНСКИЙ** (РУП «БМЗ»),
И.А. ТРУСОВА, канд. техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК, РАЗЛИВАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ МНЛЗ-3 РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Основными этапами формирования качественных и стоимостных показателей продукции являются выплавка и непрерывная разливка металла. Только при условии получения непрерывнолитой заготовки с минимальным количеством вредных примесей и неметаллических включений, бездефектной макро- и микроструктурой металла можно произвести металлопрокат, способный конкурировать с изделиями ведущих металлургических предприятий мира.

Анализ заводских данные по браку показывает, что мероприятия, проведенные во время реконструкции МНЛЗ-3 на РУП «БМЗ» в 1997 г., не позволили полностью исключить образование поверхностных трещин, рванин и ликвационных полосок. В связи с вышеизложенным в настоящее время назрела необходимость поэтапной модернизации МНЛЗ-3.

Совершенствование конструкции промежуточного ковша, стаканов-дозаторов и разливочных стаканов. Весьма важную роль в процессе непрерывной разливки играют конструкции промежуточного ковша и его элементов, материалы, из которых они изготовлены.

Основное назначение промежуточного ковша – обеспечение стабильности процесса литья и предотвращение попадания в кристаллизатор неметаллических включений.

Для решения первой задачи необходимо исключить зарастание дозирующего устройства промежуточного ковша. По мнению авторов работы [1], на склонность разливочных стаканов к зарастанию влияет несколько факторов (в порядке их значимости): отношение Mn/Si в жидкой стали; температура разливаемой стали; отклонение от оптимального для данной марки стали содержания алюминия, применяемого для окончательного

раскисления. Для обеспечения стабильности разливки необходимо поддерживать соотношение $Mn/Si \geq 2,5 \dots 3,0$, температуру разливаемой стали на $10 \dots 15$ °С выше температуры ликвидус; содержание алюминия не должно превышать 0,02%.

В то же время требуется, чтобы материал стакана-дозатора обладал стойкостью к воздействию жидкой стали. В настоящее время в металлургической промышленности все более широкое применение находят огнеупоры из стабилизированного диоксида циркония, обладающего высокой металлоустойчивостью, коррозионной и эрозионной стойкостью. В ОАО «УкрНИИО» разработана технология производства составных стаканов-дозаторов со вставкой из ZrO_2 , стабилизированного оксидами кальция или магния, и с безазотистым основанием [2].

Задача снижения количества неметаллических включений, попадающих в кристаллизатор при разливке, решается путем рациональной организации потоков расплава с помощью перегородок в промежуточном ковше, рафинированием жидкой стали за счет изменения формы промежуточного ковша и применения современных футеровочных материалов.

Эффект очищения жидкой стали от неметаллических включений, по мнению авторов работы [3], достигается посредством управления потоками расплава в промежуточном ковше и продувки металла инертным газом. Такая гидродинамическая система успешно функционирует в условиях ОАО «Азовсталь». Широкие промышленные исследования показали, что крупные включения легко удаляются затопленными струями, а мелкие и дисперсные – с помощью газовых пузырьков.

Учитывая то обстоятельство, что одним из источников неметаллических включений в разливаемой стали являются продукты разрушения и окисления материалов футеровки промежуточного ковша, необходимо повышать стойкость применяемых огнеупоров. По заказу АО «Северсталь» специалистами АО «Санкт-Петербургский институт огнеупоров» были проведены исследования с целью создания оборудования и технологии факельного торкретирования различных металлургических агрегатов [4]. С учетом требований к стойкости футеровки были разработаны новые составы торкрет-порошков на основе магнезита, доломита, оливинита с добавками.

По мнению специалистов ВНИИчермета [5], применение технологии торкретирования промежуточного ковша ограничивается высокой стоимостью материала и необходимостью специального оборудования. В качестве альтернативы авторы [5] разработали и опробовали в промышленных условиях новые огнеупорные массы на магнезитовой основе для футеровки рабочего слоя промежуточного ковша. Обмазка готовилась в бетономешалке и наносилась вручную слоем толщиной $10 \dots 12$ мм на холодную либо нагретую до температуры 80 °С футеровку. Исследования показали, что за счет увеличения стойкости промежуточных ковшей значительно уменьшилась степень загрязненности заготовок крупными неметаллическими включениями.

Для увеличения стойкости погружаемого стакана и замедления процесса затягивания канала специалисты АО «Санкт-Петербургский институт огнеупоров» в содружестве с работниками АО «Боровичский комбинат огнеупоров» предложили использовать новые материалы [6], основанные на стабилизированном диоксиде циркония, оксиде кальция и графите. Испытания, проведенные в условиях АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», показали, что стойкость новых корундографитовых погружаемых стаканов в 4 – 5 раз больше, чем тех, которые были изготовлены на основе корунда. Кроме того, удалось добиться стабильного замедления процесса затягивания канала глиноземистыми включениями и алюминатами кальция.

Чтобы исключить переохлаждение мениска в кристаллизаторе и создать благоприятные условия для всплытия неметаллических включений, специалисты Нижнетагильского металлургического комбината применили безнапорный погружаемый стакан с боковыми отверстиями [7]. За счет особенностей его конструкции металл поступает в кристаллизатор в виде турбулизированного потока. Это позволило практически полностью исключить брак, связанный с заворотами корки, в 2 – 3 раза снизить балл по хрупким и пластинчатым силикатам, на 10...12% – по сульфидам.

Таким образом, для обеспечения стабильности разливки и чистоты металла от неметаллических включений следует для футеровки промежуточного ковша и его элементов (стакана-дозатора, погружаемого стакана, стопора) использовать современные огнеупорные материалы, обладающие стойкостью к воздействию жидкой стали, механической прочностью и относительно невысокой стоимостью. Кроме того, в настоящее время востребованы новые технологии рафинирования жидкой стали путем организации рационального движения потоков расплава, продувки инертным газом, применения фильтрующих элементов и т. п.

Влияние шлакообразующих смесей, тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в жидком ядре заготовки, на качество литого металла. Для получения бездефектной продукции при непрерывном литье стали особое значение имеют процессы, протекающие в кристаллизаторе.

Шлакообразующие смеси (ШОС) в кристаллизаторе в большой степени определяют стабильность процесса литья, качество поверхности и загрязненность неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок. Основное назначение ШОС – защита зеркала расплава от вторичного окисления и теплопотерь и создание антифрикционного слоя между затвердевающей коркой и внутренней поверхностью кристаллизатора. В связи с этим наиболее важными свойствами шлака являются вязкость, количество кристаллической фазы в шлаковом гарниже, температура и скорость плавления ШОС, т.е. свойства, которые определяют эффективность смазки и интенсивность теплоотвода [8].

Комплексные исследования свойств ШОС, проведенные специалистами ЦНИИчермета [9], показали, что изменение скорости разливки требует

корректировки состава смеси. Причем увеличение скорости разливки приводит к необходимости снижения показателей вязкости и температуры плавления шлака, формирующегося из смеси. Для каждой ШОС существует оптимальная скорость разливки, при которой зона жидкого трения является наибольшей.

Для автоматизации процесса подачи ШОС в кристаллизатор применяются гранулированные смеси. По сравнению с порошкообразными они не расслаиваются при хранении и транспортировке, имеют повышенные теплоизолирующие свойства, хорошо растекаются по зеркалу жидкого металла и выделяют значительно меньше пыли и вредных веществ при использовании. Отмеченные преимущества гранулированных ШОС способствуют снижению брака по поверхностным трещинам и шлаковым включениям [10].

При вводе в строй второй очереди оборудования РУП «БМЗ» фирмой «Фест Альпине» (Австрия) было рекомендовано использовать на МНЛЗ-3 порошкообразные смеси немецкого производства (Scorialit C163-79/H, C163-79/E, C114-73). Для обеспечения стабильности данного процесса и с учетом информации, изложенной выше, при реконструкции МНЛЗ-3 необходимо предусмотреть систему автоматической подачи гранулированных ШОС.

Большое влияние на образование и развитие поверхностных и подповерхностных дефектов, степень загрязнения металла неметаллическими включениями оказывает характер движения потоков расплава в кристаллизаторе. В связи с этим вопросы управления указанными процессами являются весьма актуальными. В настоящее время для решения данной задачи применяют погружные стаканы различной конструкции, электромагнитное перемешивание и иные способы воздействия на жидкий металл. Вопросы применения погружных стаканов рассмотрены нами выше, поэтому далее подробнее рассмотрим иные способы воздействия на жидкое ядро слитка в кристаллизаторе.

Технология электромагнитного перемешивания (ЭМП) в процессе непрерывной разливки металла получила широкое применение, особенно при производстве сортовых заготовок из сталей специального назначения (высокоуглеродистой проволоки, корда и других ответственных машиностроительных изделий). По мнению авторов [11], наиболее предпочтительным является перемешивание в кристаллизаторе, так как при этом обеспечивается улучшение качества поверхности и макроструктуры заготовки. Реализация указанных преимуществ зависит не только от мощности ЭМП, но и от возможности регулировать интенсивность перемешивания на разных участках кристаллизатора. Например, весьма эффективно воздействие электромагнитного поля в районе мениска при разливке открытой струей [11]. Такой прием позволяет уменьшить поверхностную пористость на 80...90%. Но чрезмерная интенсивность перемешивания в области зеркала металла в кристаллизаторе может привести к образованию иных поверхностных дефектов – плены, заливин, ужимин и т.п.

Для создания рациональной системы перемешивания специалисты фирмы JME (Канада) предлагают использовать двойную индукционную катушку, образуемую путем объединения двух индукционных катушек. При этом катушку с длинным магнитным сердечником (M-EMS) помещают в нижней части кристаллизатора, а с коротким сердечником (AC-SM) – вблизи от мениска металла. Питание двух катушек от различных источников, регулирование силы, частоты воздействия и направления вращения позволяют управлять потоками расплава по всей длине кристаллизатора. Перемешивание двойной катушкой ЭМП улучшает структуру и качество поверхности заготовки как при разливке открытой струей, так и при разливке под уровень. При этом значительно уменьшается зона столбчатых кристаллов, повышается плотность осевой зоны. Кроме того, опыт промышленного применения описываемого устройства показал, что такой способ перемешивания позволяет на 8...15% повысить скорость разливки заготовок [11].

Помимо электромагнитного перемешивания для улучшения качества металла, получаемого на машинах непрерывной разливки, применяют и другие способы воздействия на жидкую фазу слитка. Например, учеными ФТИМС НАН Украины и специалистами МК «Азовсталь» было исследовано влияние газоимпульсного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ [12]. Как и электромагнитное перемешивание, предлагаемый способ позволяет сократить время снятия перегрева, обеспечивает удаление неметаллических включений и газов из жидкой стали. Результаты исследований показали, что газоимпульсное перемешивание дает возможность управлять процессами массопереноса примесей в двухфазной зоне, существенно улучшает макро- и микроструктуру заготовки, снижает физическую и химическую неоднородность, обеспечивает повышение плотности и дисперсности кристаллической структуры во всех зонах заготовки.

Исследования различных режимов продувки жидкого металла аргоном в кристаллизаторе, проведенные в условиях Череповецкого металлургического комбината при разливке нержавеющей стали, позволили определить оптимальный расход аргона, который составил 0,04...0,01 м³/мин [13]. При меньшем расходе не обеспечивается требуемая защита струи металла, а при большем – изменяется характер потока пузырей газа: они становятся более крупными, при их всплытии частично оголяется зеркало металла, что ухудшает качество заготовок.

Таким образом, устройства и режимы воздействия на жидкое ядро непрерывнолитой заготовки должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) независимо от природы воздействия они должны способствовать улучшению качества литого металла, сокращению брака и, по возможности, повышению производительности МНЛЗ; при этом использование того или иного устройства должно быть экономически оправдано;

2) режимы работы применяемых устройств должны регулироваться в зависимости от конструкции МНЛЗ, технологических параметров разливки (скорость разливки, температура перегрева расплава и др.) и марки стали.

Механизмы качания кристаллизатора. Значительное влияние на качество поверхности непрерывнолитой заготовки и скорость разливки оказывают режимы возвратно-поступательного движения кристаллизатора. На большинстве МНЛЗ, функционирующих в настоящее время на предприятиях металлургической промышленности, используют традиционные механизмы качания с электроприводом. В возвратно-поступательном перемещении участвуют: рычаг с системой компенсации и амортизации; механизм качания и стол кристаллизатора; сам кристаллизатор с системой охлаждения и кожухом; встроенный механизм ЭМП. Частота качания такой конструкции изменяется в пределах $50 \dots 250 \text{ мин}^{-1}$ при постоянной амплитуде $6 \dots 12 \text{ мм}$ и ограничивается инерционностью качающихся элементов, приводящей к большим динамическим нагрузкам и недопустимой вибрации.

Специалисты фирмы «Paul Wurth S.A.» (Люксембург) разработали принципиально новую конструкцию, представляющую собой гильзовый кристаллизатор со встроенным гидравлическим механизмом качания «Вибромолд», обеспечивающим частоту возвратно-поступательных движений до 600 мин^{-1} [14]. Здесь качанию подвергаются только медная гильза, верхний фланец и перегородка, а кожух с системой охлаждения, опорными роликами, устройством ЭМП и другими элементами остается неподвижным. При этом параметры движения можно изменять непосредственно в процессе разливки: частоту – от 0 до 600 мин^{-1} , амплитуду – от 0 до 4 мм. Кроме того, возможны различные профили кривой качания.

При реконструкции МНЛЗ-3 целесообразно обратить внимание на разработку одного из ведущих мировых производителей машин непрерывной разливки стали концерна «Фест Альпине» (VAI). В начале 90-х годов XX в. VAI совместно с университетом г. Линца (Австрия) разработали опытную установку механизма качания кристаллизатора [15]. Новое устройство проходило промышленные испытания на МНЛЗ-1 предприятия «Лех-Штальверке» (Германия). Основным требованием со стороны заказчика было сохранение конструкции МНЛЗ и кристаллизатора без изменений. Два года работы показали, что новая каскадная система направляющих на пластинчатых пружинах с гидроприводом практически не подвержена износу, не требует профилактического обслуживания, положительно влияет на качество поверхности заготовки, позволяет дистанционно в процессе работы регулировать ход, частоту и форму кривой качания. За время испытаний не было прорывов жидкого металла из-за качания кристаллизатора, брак уменьшился на 36% [15]. В настоящее время система качания «Динафлекс» установлена более чем на двух десятках МНЛЗ.

Кристаллизаторы современных сортовых МНЛЗ. Технологические процессы и механизмы, описанные выше, оказывают весьма существен-

ное влияние на качество непрерывнолитых заготовок и производительность МНЛЗ. Но определяющим фактором в формировании качественных показателей металла, получаемого способом непрерывной разливки, является кристаллизатор. Он выполняет функции приема жидкого металла, попадающего в него из промежуточного ковша, теплоотвода значительной части теплоты расплава, формирования однородной по толщине и составу затвердевшей оболочки, формообразования слитка. От конструкции кристаллизатора зависит скорость вытягивания и качество поверхностных и подповерхностных слоев заготовки.

Известно, что отвод теплоты в значительной степени зависит от наличия газовой воздушной зазора между стенкой кристаллизатора и коркой кристаллизующегося слитка. Как правило, для устранения либо частичной компенсации теплового сопротивления газовой прослойки кристаллизаторы делают конусными. На практике показатель конусности постоянен по всей длине кристаллизатора. Значительное повышение скоростей разливки в последнее время показало, что такая конструкция оказывается недостаточно эффективной с точки зрения отвода теплоты. С учетом естественной усадки металла при затвердевании некоторые исследователи предлагают выполнять внутреннюю поверхность кристаллизатора в виде параболического профиля [16].

Использование кристаллизаторов с параболической конусностью получило наибольшее распространение на МНЛЗ фирмы «Даниэли» (Италия). На заводе ЗАО «ММЗ-ИСТИЛ» (Украина) была пущена в строй шестиручьевая высокоскоростная МНЛЗ производства «Даниэли». За счет применения кристаллизатора с параболической конусностью при разливке квадрата 100×100 мм была достигнута скорость разливки 5,5 м/мин.

Несмотря на очевидные преимущества новых кристаллизаторов, в процессе их эксплуатации были выявлены отдельные недостатки: повышенный износ стенок кристаллизатора в случае излишней конусности; захлаживание углов заготовки; высокая сила трения между затвердевшей коркой и внутренней поверхностью кристаллизатора в области ребер слитка. Для увеличения срока службы кристаллизаторов данного типа специалистами VAI была разработана новая конструкция с открытыми угловыми областями в нижней зоне [17]. В настоящее время кристаллизаторы «Дайэмоулд» успешно эксплуатируются при разливке заготовок квадратного сечения со стороной 115...140 мм на заводах в США, Франции, Германии, Италии, Испании, Австрии и Китая. Специалистами VAI проводятся исследования с целью применения технологии «Дайэмоулд» для непрерывной разливки крупносортовых заготовок.

В качестве варианта, альтернативного предыдущему, можно использовать технологию «Конвекс» фирмы «Concast» (Швейцария), которая предполагает использование кристаллизатора переменного поперечного сечения [18]. При этом в зоне мениска для улучшения теплоотвода поверхность заготовки имеет выпуклую форму. По мере продвижения по

длине кристаллизатора кривизна стенок плавно уменьшается, и на выходе сечение приобретает строго квадратную форму. Использование кристаллизатора «Конвекс» позволило на сортовой МНЛЗ металлургического завода «Тршинецке Железарни» (Чехия) при разливке квадрата 108×108 мм достичь рекордной скорости разливки 6,4 м/мин. К концу прошлого века на трети общего количества скоростных ручьев в мире использовались описанные кристаллизаторы.

Кроме формы кристаллизатора на его стойкость и скорость теплоотвода существенное влияние оказывает материал стенок кристаллизатора. Исследование механических свойств различных сплавов меди (медно-серебряных, медно-циркониевых и др.) и результаты промышленных испытаний кристаллизаторов из этих сплавов показали значительное преимущество низколегированного медного сплава (НМС) [19].

На РУП «БМЗ» применяется технология нанесения гальванических покрытий на рабочую поверхность сборных и гильзовых кристаллизаторов [20]. Для этих целей используют соединение никеля и фосфора. Благодаря нанесению многослойного покрытия (никель, никель – фосфор и хром) и применению медных жаропрочных сплавов отечественно производства стойкость гильзовых и сборных кристаллизаторов повысилась со 150 до 175 и с 300 до 370 соответственно.

На основании информации, изложенной выше, можно сделать вывод, что кристаллизаторы современной МНЛЗ должны обладать формой, обеспечивающей интенсивный и равномерный по периметру теплоотвод от поверхности затвердевающей заготовки, а также механической прочностью и долговечностью.

Организация режимов охлаждения и разработка систем управления расходом воды в зоне вторичного охлаждения. Качество продукции во многом определяется процессами охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). При неоптимальной организации охлаждения возможно раскрытие дефектов, зарождающихся в кристаллизаторе (продольных, поперечных, паукообразных трещин), появление холодных трещин. В случае существенного разогрева поверхности слитка после выхода из ЗВО возможно образование внутренних дефектов – горячих трещин и ликвационных полосок. Кроме того, ЗВО должна дополнительно выполнять функцию охлаждения опорных конструкций.

В настоящее время широко распространено ролико-форсуночное охлаждение слитка с применением водяных и водовоздушных форсунок. Кроме отмеченных вариантов при разливке трещиноподобных сталей применяется комбинированная система охлаждения [21]. При сочетании водяного, водовоздушного и парового охлаждения, обеспечивающих коэффициенты теплоотдачи от 200...400 до 150...180 Вт/(м²·К), снижается амплитуда колебаний температуры поверхности по длине непрерывнолитого слитка, характерная для водяного охлаждения. Использование комбинированной системы охлаждения на МНЛЗ комбината «Азовсталь» позволило снизить брак по поверхностным трещинам.

Большое число публикаций посвящено организации «мягкого» водовоздушного охлаждения [22 – 24]. Эффективность водовоздушного охлаждения объясняется тем, что благодаря высокой кинетической энергии с металлом одновременно контактирует большое количество распыленной воды. При одном и том же расходе площадь теплообмена между водой и заготовкой увеличивается: с одной стороны вода мелко распылена и число капель очень велико, с другой – эти капли равномерно распределяются по поверхности заготовки. Применение водовоздушной системы охлаждения позволяет снизить количество дефектов поверхности и осевую ликвацию, исключить образование трещин по кромке слитка, на 15...20% повысить скорость разливки [22]. Кроме того, благодаря конструктивным особенностям водовоздушные форсунки имеют большой диапазон регулирования, за счет чего можно гибко управлять режимами охлаждения непрерывнолитых заготовок в ЗВО. Но сама система управления при этом усложняется, так как необходимо управлять расходом не только воды, но и воздуха.

Без сомнения, реализация оптимальных режимов охлаждения приводит к ужесточению требований к конструкции ЗВО. Прежде всего это касается форсунок, которые должны обладать стабильным углом распыла и обеспечивать равномерное распределение охладителя (воды или водовоздушной смеси) по всему объему факела в широком диапазоне регулирования, быть малочувствительными к засорению [22, 24].

Учитывая результаты исследований режимов охлаждения непрерывнолитых заготовок на МНЛЗ-3, проведенных специалистами КНПЛ «ПМП» [25], и информацию, изложенную выше, можно сделать нижеследующие выводы.

1. При реконструкции МНЛЗ-3 новую систему ЗВО необходимо конструировать таким образом, чтобы обеспечить плавное, без скачков понижение температуры поверхности заготовки для всего марочного сортамента. К зоне правки она должна находиться в диапазоне пластичности (900...1100 °С). В настоящее время при скоростях разливки 0,6...0,7 м/мин наблюдается переохлаждение поверхности слитков, что приводит к повышению нагрузок в правильной машине и уровня напряжений в разгибаемой заготовке. А это, в свою очередь, может спровоцировать образование холодных трещин либо раскрытие поверхностных дефектов, образовавшихся выше (в кристаллизаторе или в ЗВО).

2. Целесообразно рассмотреть вариант организации комбинированного охлаждения: в первых секциях ЗВО – водяное, а далее – «мягкое» водовоздушное или паровоздушное.

3. Работа ЗВО во всем диапазоне скоростей разливки должна автоматически управляться с помощью динамической системы, учитывающей конструктивные особенности МНЛЗ.

Выбор рациональной роликовой схемы МНЛЗ. Применение технологии «мягкого» обжатия с целью улучшения качества осевой зоны непрерывнолитых заготовок. Причиной образования дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки могут быть не только недостатки и

нарушения технологических режимов, но и механические напряжения, возникающие при вытягивании, изгибе и выпрямлении слитка. В связи с этим выбор рациональной схемы размещения поддерживающих, опорных, изгибающих и разгибающих роликов, обеспечение жесткости разливочной дуги, прочности и долговечности подшипниковых узлов конструкции являются первоочередной задачей при строительстве и реконструкции МНЛЗ.

Исследования зависимостей усилий правки от конструктивных и технологических факторов описаны в работе [26]. Авторы делают вывод, что податливость роликового аппарата оказывает весьма существенное влияние на нагрузку правки. Увеличение податливости приводит к образованию своеобразной «подушки» из роликов. Расчеты показали, что усилие правки практически пропорционально реологической жесткости непрерывнолитых заготовок. На жесткость весьма существенно влияет температура поверхности слитка, изменяющаяся в зависимости от технологических параметров разливки, но при этом авторы [26] отмечают, что скорость разливки практически не влияет на нагрузку в правильной машине благодаря взаимной компенсации факторов увеличения скорости деформирования и уменьшения реологической жесткости металла. Кроме того, исследования показали, что сокращение расстояния между роликами на участке правки приводит к пропорциональному уменьшению нагрузки.

Применение оригинальной конструкции роликовой секции CyberLink, разработанной фирмой SMS Demag AG, является новым шагом к улучшению качества и экономичности технологии непрерывного литья заготовок [27]. Особенностью секции CyberLink является то, что ролики не нуждаются в боковой раме и подъемной траверсе, а центрирование обеспечивается автоматически за счет направляющих устройств верхней рамы. Это не только позволяет упростить конструкцию, но и практически полностью исключает возникновение поперечных воздействий со стороны роликов на затвердевающую заготовку. Кроме того, новая технология дает возможность с высокой степенью точности определять положение жидкой лунки. Используется весьма простой и надежный способ: ролики с помощью прижимных цилиндров подвергают качанию с амплитудой 0,3 мм и частотой 3 Гц, затем определяют ход верхней рамы и усилие качания и строят диаграмму зависимости усилие – перемещение. В результате получается кривая гистерезиса, площадь петли которой численно равна количеству энергии, необходимой для качания, и ступенчато изменяется при переходе металла из двухфазного состояния в твердое. Таким образом, определяется секция, где заканчивается жидкая лунка. Данный способ прост в реализации, значительно точнее применяемых математических моделей, так как автоматически определяет металлургическую длину слитка даже в случае непредвиденных сбоев в процессе непрерывной разливки (отказ форсунок в ЗВО, изменение начальной температуры расплава, отключение катушки ЭМП и т.д.), не требует большого количества контрольно-измерительных приборов и сложного программного обеспечения. Про-

мышленные испытания технологии CyberLink показали, что она позволяет в 2 раза уменьшить износ роликов МНЛЗ, улучшить качество непрерывнолитых заготовок за счет устранения давления на затвердевающую корку со стороны роликов, увеличить скорость разливки и выход годного литья.

Знание положения жидкой лунки и соотношения объемов закристаллизовавшегося и жидкого металла по длине технологической оси МНЛЗ необходимо при организации «мягкого» обжатия. Достаточно широкое распространение данный способ получил на машинах непрерывной разливки слябов [28]. Например, фирмой VAI разработана конструкция гидравлически регулируемого сегмента SMART. Совместное применение данного устройства и системы автоматического управления, контролирующей технологические параметры непрерывной разливки и определяющей положение жидкой лунки, позволяет добиться существенного улучшения качества осевой зоны сляба. Это подтверждается высоким качеством продукции, получаемой на слябовой МНЛЗ компании Rautaruukki Oy, которая первой в мире была полностью оборудована системой динамического вытягивания слитка, состоящей из пятнадцати сегментов SMART.

Применение метода «мягкого» обжатия для динамического воздействия на внутренние объемы блюмов имеет свои особенности, связанные с геометрической формой заготовок. Большая жесткость затвердевшего каркаса блюма по сравнению со слябом приводит к существенному увеличению усилия обжатия. Кроме того, приложение усилия обжатия по двум граням может вызвать выпучивание двух других граней, что нивелирует эффект подавления осевой ликвации. Исследованиями установлено, что эффективность «мягкого» обжатия во многом зависит от места приложения и давления на заготовку. По мнению некоторых исследователей, максимальный положительный результат можно получить при обжатии заготовки, в которой доля твердой фазы в осевой зоне составляет более 50%. При этом подавление осевой ликвации достигается за счет выдавливания жидкого металла в более высокие горизонты.

В настоящее время все шире используется технология «мягкого» обжатия с помощью валков, длина бочки которых меньше, чем длина грани непрерывнолитой заготовки [29]. Например, на заводе «Ниппон кокан» (Япония) при разливке блюмов сечением 250×400 мм для этих целей применяют валки длиной 250...300 мм.

В связи с тем, что проблема возникновения осевой ликвации и пористости особенно важна при разливке стали высокоуглеродистых и легированных марок, вопросы организации «мягкого» обжатия актуальны для РУП «БМЗ». Исследования специалистов завода, посвященные изучению возможности применения данного метода с целью улучшения качества непрерывнолитых заготовок, отливаемых на МНЛЗ-3, представлены в статье [30].

Автоматизированные системы управления процессом непрерывной разливки. В настоящее время автоматизация технологического про-

цесса непрерывной разливки достигла высокого уровня и приобретает комплексный характер.

Фирма VAI работает в области автоматизации МНЛЗ с начала 80-х годов XX в. В настоящее время специалистами VAI разработана концепция управления МНЛЗ, основную идею которой можно сформулировать так: «Подключайся и разливай» [29]. Система управления состоит из распределенных модулей. Каждый компонент подключен к устройству сбора данных, которое объединяет отдельные компоненты в единую систему и обеспечивает данные для человеко-машинного интерфейса. Блоки оборудованы специальными интеллектуальными и операционными системами и могут функционировать как автономные устройства для профилактического ухода или испытаний и т.п. Примерами отдельных блоков схемы «подключайся и разливай» могут служить устройство качания кристаллизатора «Динафлекс» [15], система автоматизации уровня L2. Последняя имеет модульную структуру и спроектирована с целью оптимизации технологического процесса разливки. Она включает модели для динамичного управления системой вторичного охлаждения, оптимизации выхода годного, управления качеством и другого технологического регулирования.

Среди последних разработок отдела автоматизации VAI следует выделить систему «Моулд-эксперт» и АСТК (автоматическая система регулирования конусности слитка) [29]. Основные функции, выполняемые системой «Моулд-эксперт», – текущий контроль за температурой и механизмом качания) кристаллизатора, предотвращение прорывов жидкого металла, расчет теплового потока и трения. АСТК спроектирована с целью уменьшения сегрегации в центральной зоне слитка. Она управляет гидравлически регулируемыи сегментами SMART (система моментального автоматического регулирования толщины), компенсирующими термическую усадку слитка. По мнению специалистов VAI, в последующие годы помимо разработки не требующих сложного ухода систем автоматизации основной задачей будет осуществление дальнейшего прогресса в разработке моделей для описания критических моментов процесса непрерывной разливки с целью более эффективного управления качеством литой продукции.

Ю.Е. Канн [31] в качестве основополагающего принципа создания системы автоматического управления процессом непрерывной разливки предлагает использовать принцип «стандартной технологии». Данную методику можно реализовать на основе выявленных взаимосвязей качества слитка и технологических параметров, т.е. должен быть осуществлен принцип ведения процесса в жестких рамках технологической схемы (такой метод принят при непрерывной разливке в Германии и Японии). Любые изменения возможны только после проведения соответствующих исследований. По мнению автора [31], основным принципом системы управления МНЛЗ должно быть не исправление в процессе разливки ошибок, допущенных в период подготовки металла к разливке, а подго-

товка металла в строгом соответствии с требованиями технологии, не идентификация брака, полученного при разливке, а предупреждение его появления в результате соблюдения оптимальных параметров технологии. Такая система экономична, поскольку не требует применения дорогостоящей аппаратуры (дефектоскопов, ЭВМ), контрольно-измерительных приборов и т.п.

В условиях РУП «БМЗ» функционирует система «Оракул», которая с помощью математических моделей, разработанных на основе фундаментальных термодинамических и физико-химических закономерностей, способна предварительно проектировать режимы работы сталеплавильных агрегатов, оборудования для внепечной обработки и непрерывной разливки стали [32]. Основными входными параметрами модели непрерывной разливки в данной системе являются температура разливаемого металла, скорость разливки, расходы охлаждающей воды в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения. В процессе работы рассчитываются текущая температура поверхности и толщина твердой корки по длине слитка, глубина жидкой лунки и продолжительность полного затвердевания заготовки, распределение температуры по поперечному сечению слитка, рациональные расходы воды по секциям, максимально допустимая скорость вытягивания для предотвращения образования внутренних трещин. Понесенное введение и применение автоматических систем управления (АСУ), используемое в системе «Оракул» последовательно для всех основных агрегатов технологического процесса, на наш взгляд, перспективно. Но следует избегать излишнего усложнения и удорожания АСУ, так как это может привести к превышению затрат на управляющую систему над стоимостью брака, который будет предотвращен или идентифицирован.

Итак, в статье рассмотрены современные конструктивные и технологические решения основных устройств и систем машин непрерывной разливки стали, проанализированы наиболее перспективные разработки, опыт которых целесообразно учесть при проведении реконструкции МНЛЗ-3 РУП «БМЗ». Основное внимание уделено обеспечению качества литого металла на всех стадиях разливки – от промежуточного ковша до момента получения мерной заготовки. При этом отмечается, что получение качественной непрерывнолитой заготовки является залогом высокого качества готовой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко В.В., Останина Л.В. Заращение разливочных стаканов при непрерывной разливке низкоуглеродистой стали на сортовые заготовки // *Сталь*. 1998. № 3. С. 40 – 42.
2. Применение отечественных составных стаканов-дозаторов в промежуточных ковшах МНЛЗ с малым сечением кристаллизатора / Х.С. Разз, В.В. Примаченко, А.Г. Караулов и др. // *Сталь*. 2002. № 8. С. 43 – 44.
3. Ефимов Г.В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше // *Сталь*. 2001. № 4. С. 24 – 27.

4. Кузнецов Г.И., Кортель А.А. Новые разработки в области огнеупоров для прогрессивных технологий металлургического производства // Сталь. 1995. № 4. С. 25 – 27.
5. Качев П.Н., Лейтес А.В., Канн Ю.Е. Повышение стойкости футеровки промежуточных ковшей и снижение загрязненности непрерывнолитых заготовок // Сталь. 1981. № 3. С. 21 – 23.
6. Новая технология изготовления корундографитовых погружаемых стаканов для сортовой МНЛЗ / Л.М. Аксельрод, И.В. Егоров, В.П. Мигаль и др. // Сталь. 1997. № 5. С. 28 – 30.
7. Управление потоками стали в кристаллизаторе с помощью разливочных стаканов / В.И. Ильин, Л.К. Федоров, Б.А. Коротков и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 3. С. 19 – 22.
8. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки. М.: Металлургия, 1984. 200 с.
9. Улучшение поверхности непрерывнолитого слитка путем оптимизации свойств шлакообразующей смеси / В.М. Паршин, И.И. Шейнфельд, В.М. Кукарцев и др. // Сталь. 1986. № 7. С. 22 – 24.
10. Ногтев В.П., Юречко Д.В., Сатосин М.В. Сопоставление эффективности шлакообразующих смесей путем измерения силы трения в кристаллизаторе // Сталь. 1999. № 11. С. 25 – 26.
11. Бейтельман Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе // Сталь. 1997. № 4. С. 21 – 24.
12. Повышение однородности осевой зоны непрерывнолитых слябов методами внешних воздействий / Р.Я. Якобше, Ю.Я. Скок, В.Н. Баранова и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 10. С. 143 – 146.
13. Совершенствование технологии непрерывной разливки коррозионностойкой стали / Б.А. Коротков, В.М. Кукарцев, О.Е. Молчанов и др. // Металлург. 1986. № 3. С. 28 – 29.
14. Кель Н., Лонарди Э., Шерген П. Гильзовый кристаллизатор высокоскоростных МНЛЗ со встроенным механизмом гидравлического качания «Вибромолд» // Сталь. 1999. № 4. С. 23 – 26.
15. Освоение устройства качания кристаллизатора «Динафлекс» на предприятии «Лех-Штальверке» / Н. Кель, К. Мервальд, Й. Пеппл, Х. Тене // Сталь. 2001. № 2. С. 53 – 55.
16. Хорбах У., Коккентид Й., Юнг В. Литье сортовых заготовок на МНЛЗ с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля // МРТ. 1998. № 3. С. 42 – 51.
17. Высокоскоростная МНЛЗ производства ФАИ / Ж.Л. Минг, Х.П. Коглер, Г. Зедербауер и др. // Сталь. 2001. № 1. С. 62 – 64.
18. Rischka B., Rushforth M., Tercelli C. Special Bar Quality (SBQ) Production International Conf. Trinec (Czech rep.) 1997. P. 15 – 32.
19. Ермолюк Т.Д., Лях А.П., Целиков А.А. Повышение эксплуатационной стойкости кристаллизатора МНЛЗ // Сталь. 1981. № 5. С. 33 – 36.
20. Бусел Н.А., Ходоренко Т.Г. Многослойное гальваническое покрытие кристаллизаторов УНРС // Бюл. науч.-техн. инф. Черная металлургия. 1990. № 1. С. 11 – 14.
21. Комбинированная система охлаждения непрерывнолитых слитков. / О.Н. Ермаков, В.И. Лебедев, О.В. Носоченко и др. // Сталь. 1991. № 2. С. 23 – 25.
22. Шатохин С. Использование преимуществ современных водовоздушных форсунок во вторичных зонах МНЛЗ // Сталь. 2002. № 9. С. 28 – 33.

23. Водовоздушное охлаждение блюмовых заготовок на МНЛЗ Оскольского электрометаллургического комбината / Ю.М. Айзин, В.И. Ганин, А.М. Ереметов и др. // Сталь. 1989. № 9. С. 28 – 30.

24. Усовершенствование конструкции коллектора в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / К.Н. Вдовин, А.Д. Носов, С.В. Горосткин и др. // Сталь. 1999. № 11. С. 24 – 25.

25. Комплексные исследования процессов формирования непрерывнолитых стальных заготовок с целью повышения качества / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, Н.В. Андрианов и др. // Литье и металлургия. 2004. № 1. С. 5 – 11.

26. Корзунин Л.Г., Буланов Л.В. Зависимость усилий правки непрерывнолитой заготовки от конструктивных и технологических факторов // Сталь. 1999. № 9. С. 22 – 24.

27. Улучшение качества и повышение экономичности технологии непрерывного литья заготовок / П. Мюллер, Г. Грундман, Х. фон Выл и др. // Черные металлы. 2003. № 2. С. 44 – 48.

28. Автоматическое регулирование конусности и толщины непрерывнолитого слитка в ходе процесса непрерывной разливки / К. Федершпиль, К. Мервальд, М. Талхаммер и др. // Черные металлы. 2001. № 6. С. 64 – 69.

29. Тюрин В.А. Повышение качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2000. № 12. С. 13 – 15.

30. Маточкин В.А., Стеблов А.Б., Оленченко А.В. Идея «мягкого» обжата как способ управления усадочными и ликвационными процессами при затвердевании непрерывнолитых заготовок // Литье и металлургия. 2003. № 1. С. 37 – 40.

31. Канн Ю.Е. Управление качеством непрерывнолитых заготовок // Сталь. 1991. № 1. С. 27 – 28.

32. Скрыбин В.Г. Математическое моделирование процессов для АСУ выплавки // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 10. С. 98 – 100.

УДК 669.046: 536.12: 518.61

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),
И.А. ТРУСОВА, канд. техн. наук, **Д.Н. АНДРИАНОВ**, канд. техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
В.А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук,
В.И. ЩЕРБАКОВ, **И.В. КОТОВ** (РУП «БМЗ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТАНОВ 320 И 850 РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Идеология комплексных исследований промышленных агрегатов нашла широкое применение в практике металлургического производства. Преимущества совместного проведения теоретических и экспериментальных исследований очевидны. С одной стороны, экспериментальные данные позволяют оценить реальное состояние конкретного устройства, с другой – выполнить параметрическую настройку математической модели исследуемого процесса,