

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

---

УДК 621.746

В.А. МАТОЧКИН, канд. техн. наук,  
Д.Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук,  
В.Н. ПРОХОРЕНКО (РУП «БМЗ»)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ РУП «БМЗ»

**Введение.** В связи с программой модернизации сталеплавильного производства на РУП «БМЗ» целесообразно акцентировать внимание на факторах, которые не в полной мере учитываются при эксплуатации агрегатов в действующих цехах. Принятые и осуществляемые проекты решают в основном проблемы текущего момента без должного учета ближайшей перспективы. Между тем в последние 20 лет в металлургии происходят серьезные изменения как в технологии, так и в конструкциях основного оборудования, постоянно ужесточаются требования потребителей к содержанию вредных примесей и неметаллических включений, а также свойствам металлопродукции. Поэтому при определении технологических и конструктивных параметров модернизации агрегатов необходимо учитывать современные научно-технические разработки в этой области.

Эффективность непрерывной разливки в значительной степени зависит от стабильности физико-химического состояния расплава, которое формируется при движении металла от выпуска жидкой стали в ковш, через агрегат внепечной обработки, далее в промежуточный ковш и кристаллизатор. Не останавливаясь на известных технологических приемах внепечной обработки расплава, считаем целесообразным уделить внимание вопросам, связанным с машиной непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

За последние годы произошли существенные изменения в конструкции и функциональных возможностях основного технологического оборудования МНЛЗ, начиная с промежуточного ковша.

Длительное время функция промежуточного ковша ограничивалась приемом жидкого металла из сталеплавильного ковша и распределением его по ручьям машины. При этом решались задачи минимизации потерь теплоты, предотвращения вторичного окис-

ления и затягивания неметаллических включений в канал разливочного стакана, в какой-то степени усреднения химического состава и температуры и др. В настоящее время промежуточный ковш – это дополнительная самостоятельная реакционная емкость, в которой рафинируют, модифицируют и микролегируют сталь.

Существуют различные способы достижения высокого уровня технологического процесса МНЛЗ: подогрев металла в промковше, автоматизация технологического процесса, виброобработка стали в кристаллизаторе и др. Рассмотрим возможности, достоинства и недостатки этих способов.

**Подогрев металла в промковше.** В мировой практике (Япония, Германия, Англия, США) в последнее десятилетие ведутся исследования в направлении расширения технологических функций и повышения эффективности работы промежуточного ковша (ПК). Одной из важнейших функций ПК является регулирование в возможно более узких пределах температуры металла, поступающего в кристаллизатор, с целью обеспечения оптимальной температуры его перегрева выше температуры ликвидус [1, 2].

Японские исследователи провели изучение макроструктуры непрерывных слитков сечением 110×110 мм из стали с содержанием углерода 0,60...0,64%, отлитых при различных температурах металла в ПК. При высокой температуре разлива (1550 °С) образовывалась развитая столбчатая структура, в центре осевой части слитка возникала раковина и местами отчетливо просматривались мосты, наблюдались прямая и обратная ликвации. На границе раздела обратной и прямой ликваций обнаруживали V-образную ликвацию. Для средней температуры разлива (1523 °С) было характерно образование равноосных кристаллов, а ликвация была менее выражена. При низкой температуре разлива (1487 °С) макроструктура полностью состояла из равноосных кристаллов, осадочная раковина отсутствовала, пористость уменьшилась, перейдя в диффузионную форму, V-образная ликвация также приобрела диффузионный характер (рис. 1). Было установлено, что снижение интенсивности вторичного охлаждения приводит к уменьшению зоны столбчатой кристаллизации и увеличению зоны равноосных кристаллов в осевой части слитка. При этом в слитках из сталей с ограниченным интервалом кристаллизации происходило заметное рассредоточение осевой пористости и осевой ликвации [3].

Для обеспечения оптимальной температуры перегрева выше температуры ликвидус за рубежом наибольшее развитие получили два направления: 1) различные варианты индукционного нагрева металла в ПК; 2) нагрев под воздействием дугового или плазменно-дугового разряда. Второй вариант обеспечивает ряд технологических, технических и экономических преимуществ по сравнению с первым.

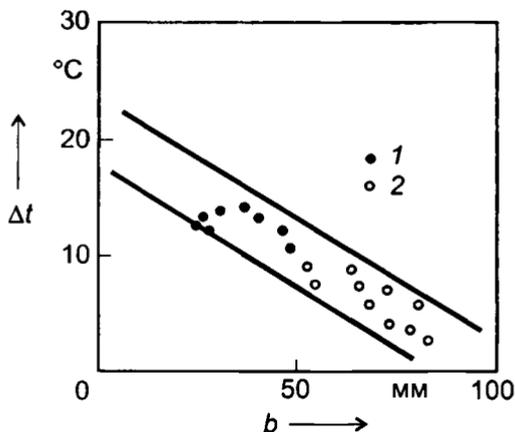


Рис. 1. Зависимость макроструктуры и ликвации от перегрева металла в промежуточном ковше  $\Delta t$  ( $b$  – ширина зоны равноосных кристаллов): 1 – присутствие V-образной ликвации; 2 – отсутствие V-образной ликвации

Нагреватель плазменно-дугового разряда позволяет достаточно гибко и в широких пределах регулировать подводимую к металлу мощность, при определенных условиях обеспечивать его перемешивание, осуществлять локальный нагрев металла в пределах данной секции ПК, при работе с подачей плазмообразующего газа (в режиме плазмотрона) создавать контролируруемую атмосферу, нагревать и активизировать шлак [4].

Дуговые и плазменные нагреватели могут работать от сети как переменного, так и постоянного тока [4, 5].

Основные требования к дуговому (плазменному) нагревателю для ПК:

- достаточная для компенсации максимальных тепловых потерь (при смене сталеразливочного ковша) мощность нагрева;
- возможность регулирования температуры металла, поступающего в кристаллизатор, в пределах  $\pm 5$  °С;
- отсутствие загрязнения металла материалом электрода и газовыми примесями;
- возможность контроля уровня металла в ПК по напряжению дуги;
- возможность работы на короткой дуге (50...150 мм) основное время разливки и увеличение длины дуги (до 250...350 мм) после смены ПК и сталеразливочного ковша;
- надежная работа нагревателя в течение всей серии разливаемых плавов.

При выборе электропитания для дугового нагревателя ПК предпочтение отдано постоянному току, так как при этом дуговой (либо плазменный) разряд имеет ряд известных специфических преимуществ [6, 7], основными из которых являются: отсутствие периодического изменения полярности дуги (эмиттером разряда – катодом – при этом служит сводовый графитовый электрод либо плазмотрон, а не электрод или нагреваемый металл попеременно); использование одного сводового электрода (плазмотрона) вместо трех при нагреве трехфазной дугой переменного тока; прохождение рабочего тока по объему ванны от анодного (подового) электрода к дуге; отсутствие скин-эффекта при прохождении по проводнику постоянного тока; минимальная индуктивность короткой сети. Эти отличия позволяют обеспечить ряд важных преимуществ при решении вопросов технологии, экономики, экологии, условий труда обслуживающего персонала и др.

Для определения оптимального типа нагревателя предпочтение отдается плазмотрону с графитовым катодом (ПГК). Он представляет собой полый металлический водоохлаждаемый штوك электрододержателя с закрепленным на его рабочем торце полым графитовым катодом. Через полость плазмотрона подается плазмообразующий газ (обычно аргон) с расходом 10...20 м<sup>3</sup>/ч. ПГК надежен, позволяет работать на короткой (до 50...70 мм) дуге, активизирует нежелательные газовые примеси в атмосфере ПК, допускает примерно вдвое большую плотность тока на катоде, чем на обычном графитовом электроде, обеспечивает втрое меньший расход графита и соответственно минимальное загрязнение расплава углеродом [6, 8]. Кроме того, ПГК позволяет в случае необходимости обрабатывать металл в ПК активными пылевыми и газовыми реагентами, подаваемыми через плазмотрон.

Исследование особенностей работы ПГК проводили на плавильных лабораторных и промышленных печах в условиях, близких к условиям нагрева металла в ПК. В качестве плазмообразующего газа использовали в основном аргон. Было установлено, что энергетически наиболее выгодна работа на дугах длиной 70...150 мм (нижний предел определяется изменением уровня металлической ванны при продувке ее аргоном). Работа на более длинных (200...350 мм) дугах целесообразна только в начальный период нагрева после смены сталеразливочного или промежуточного ковша для прогрева футеровки.

В качестве плазмообразующего газа можно использовать также азот (когда это допускается требованиями к качеству металла). В этом случае повышается экономичность и улучшаются энергетические характеристики нагрева, градиент напряжения повышается до 10 В на 1 см длины дуги.

Расход графитового катода диаметром 200 мм при силе тока до 15 кА не превышает 1,2 кг/ч, что примерно втрое ниже, чем для сплошного графитового электрода в условиях дуги постоянного тока, и практически на порядок меньше, чем при нагреве дугой переменного тока. Длительность работы такого катода до срабатывания – не менее 20 ч.

Результаты расчетов и данные экспериментов показали, что возможное науглероживание металла не может превышать 0,0003% для рассматриваемых условий даже при допущении поступления в металл всего расходуемого графита. Реально в металл при длине дуги 50 .. 100 мм может перейти не более 10% расходуемого графита, т.е. возможное науглероживание 350 т жидкого металла не превысит 0,0001%.

При градиенте напряжения в столбе разряда 8 В/см регулятор обеспечивает постоянство напряжения на разряде в пределах 3... 4 В. В пределах 5 мм поддерживается постоянство длины дуги. Таким образом, контроль уровня металла в ПК возможен с такой же точностью по перемещению штока электрододержателя.

Вероятность насыщения металла азотом, поступающим вместе с аргоном (чистота аргона 99,9%), ничтожно мала: она измеряется сотысячными долями процента. Возможность регулирования температуры поступающего в кристаллизатор металла в пределах  $\pm 4$  °С подтверждена экспериментально.

Приведенные результаты исследований подтверждают обоснованность выбора ПГК в качестве оптимального варианта для нагрева металла в ПК.

**Конструкция подового электрода для ПК.** Проблема создания подового электрода для ПК МНЛЗ может быть решена двумя способами: 1) подключение положительного полюса источника непосредственно к кристаллизатору или к вытягиваемой заготовке; 2) установка в нижней части стенки ПК или подине специального подового электрода. В первом случае ток проходит от положительного полюса источника по цепи кристаллизатор – заготовка – струя металла – ванна – дуга. Такая схема, конструктивно менее сложная, используется, в частности, в горизонтальных МНЛЗ фирмы «Маннесманн Демаг Хюттентехник» (MDH). Однако опыт эксплуатации этой схемы невелик, и нагреватели MDH имеют меньшие мощность и токовую нагрузку. Кроме того, такая схема вносит определенные технологические ограничения, поскольку электрическая цепь замыкается только при непрерывном истечении струи металла в кристаллизатор, т.е. нагреватель не может быть использован, например, для предварительного нагрева футеровки ПК и т.д.

Результатом комплекса работ явилась конструкция неводоохлаждаемого пластинчатого металлокерамического подового электрода. Использование подового электрода не исключает возможнос-

ти применения первой схемы – подключения анодной шины к кристаллизатору (в случае подтверждения ее работоспособности на практике).

В приемной секции должен обеспечиваться максимальный барботаж металла. Интенсивная продувка аргоном способствует значительному теплообмену, завершению реакций обезуглероживания, удалению азота и водорода, эффективному использованию раскислителей, вводимых в металл на предварительных стадиях, укрупнению неметаллических включений. Однако при этом не создаются оптимальные условия для их удаления в шлаковую фазу, что объясняется неконтролируемыми гидродинамическими потоками в ванне.

**Автоматизация технологического процесса.** Для достижения высокого уровня технологического процесса используется автоматизация непрерывной разливки, которая приобретает все более комплексный характер. Разработка совершенных систем управления качеством продукции дает возможность полнее использовать потенциал имеющихся агрегатов и оборудования.

Фирма «ФАИ» (Австрия) работает в области автоматизации машин непрерывного литья заготовок с начала 80-х годов XX в., постоянно совершенствуя системы управления технологическими процессами, а также создавая модели процесса и так называемые накопители данных, что способствовало существенному улучшению качества непрерывнолитых заготовок. Выполнены и другие важные разработки. Например, в распоряжении пользователя появились модульные решения, которые ускоряют сроки реализации проектов, улучшают надежность системы и обеспечивают большую гибкость при модернизации действующих МНЛЗ. Кроме того, достижения в области передачи данных по сетям и глобальных коммуникаций открывают новые возможности для оказания технического содействия покупателю и его обслуживания. Возрастающие требования к качеству заготовки и конечной продукции диктуют необходимость оперативного компьютерного обеспечения для оптимизации технологического процесса. Безусловно, новые разработки в области АСУТП и их оптимизация, а также в системах управления качеством и объединение этих систем в единый комплекс с планированием производства будут способствовать выпуску бездефектной продукции. Наряду с этим использование накопителей данных и усложненных способов их оценки обеспечивает углубление знаний о технологическом процессе или ноу-хау.

Здесь рассматривается несколько аспектов автоматизации МНЛЗ: новые системы управления технологическим процессом; математическое моделирование; накопители данных о качестве; концепция «подключайся и разливай» на МНЛЗ; новый подход к реализации проекта и оперативное обслуживание покупателей.

Системы управления технологическим процессом регулируют уровень металла в кристаллизаторе и составляют основу автоматизированного управления. Следует выделить две последние разработки отделов автоматизации, техники и технологии фирмы «ФАИ» – системы «Моулд-эксперт» и АСТК (автоматическая система регулирования конусности слитка).

Система «Моулд-эксперт» обеспечивает более полную информацию, на основе которой можно разработать новые технологические приемы и установить пороговые значения для подачи аварийных сигналов, что обеспечит большую стабильность процесса. Основные функции системы – текущий контроль за температурой и механизмом качания кристаллизатора, предотвращение прорывов жидкого металла, расчет теплового потока и трения. На монитор основного процесса поступает информация о различных функциях, а также картина условий процесса внутри кристаллизатора. Эффективное использование разливочного порошка как на мениске, так и в области зазора между слитком и кристаллизатором определяет качество процесса разливки. Взаимодействие поверхности оболочки слитка и медных плит кристаллизатора может быть рассмотрено как трение кристаллизатора. Сила трения количественно описывает поведение порошка в ходе процесса разливки.

Система регулирования конусности слитка АСТК спроектирована с целью уменьшения сегрегации по его центральной оси. Она направлена на компенсацию термической усадки в размягченной области слитка с помощью гидравлически регулируемых сегментов SMART (система моментального автоматического регулирования толщины), которые составляют основу для обеспечения полностью динамической системы вытягивания слитка. Кроме уже испытанной в эксплуатации механической конструкции этих сегментов и использования простого и стабильно работающего гидравлического оборудования необходима надежная и устойчивая система автоматизации. Заданные значения профиля зазора определяются из картины температурного поля слитка, рассчитанного с использованием модели слежения за тепловым состоянием и устройств регулирования зазора для плавного его уменьшения. Расчет учитывает местоположение зазора и длину размягченной области слитка, в котором сталь пребывает в жидко-твердом состоянии.

Непрерывная разливка – один из наиболее сложных процессов в производстве стали. За последние годы в мире были предприняты немалые усилия для описания процесса с использованием различных математических моделей. В ряде областей были получены многообещающие результаты для моделей, проверенных физическим моделированием и фактически измеренными данными.

В условиях быстрого роста компьютерных мощностей в течение нескольких последних лет разрабатывались все более сложные математические модели. Усовершенствованные модели могут быть использованы для оперативного управления процессом и его оптимизации.

Благодаря измерениям с помощью новых разработанных датчиков в кристаллизаторе появляется дополнительная оперативная информация о процессе затвердевания, что, в свою очередь, служит стимулом для поиска новых подходов к математическому моделированию.

Работа в настоящее время сосредоточена на использовании последних результатов исследования математических моделей, нацеленных на улучшение эффективности производства стали, например математических моделей, определяющих температуру непрерывнолитого слитка различного марочного состава.

Дальнейшие разработки в этой области направлены в основном на моделирование образования включений и трещин в процессе разлива. Такие модели применяются для уточнения имеющейся системы прогнозирования дефектов, основанной на статистике. Знания, полученные посредством моделирования, могут быть использованы для совершенствования технологии разлива и подавления образования дефектов.

В 1997 г. специализированный накопитель данных о качестве для процессов выплавки стали и непрерывной разлива был разработан и внедрен фирмой «ФАИ» на заводе «Эрдемир» в Турции. Система «ФАИ-Ку Дискавери» установлена уже на трех металлургических заводах и намечается к внедрению еще на четырех предприятиях. Система включает данные о качестве и технологическом процессе, полученные на основе производственных процессов выплавки стали и непрерывной разлива, на основании которых затем совершенствуется производство.

В 1998 г. австрийская компания «Фест-Альпине Шталь Линц» (ФАШЛ) и фирма «ФАИ» начали совместную разработку накопителя данных о качестве «ФАИ-Ку Дискавери» для всего предприятия. Эта система была введена в эксплуатацию весной 2000 г. на линии технического контроля и линии лужения на ФАШЛе. Вслед за опытной установкой планируется ее комплексное внедрение по всей технологической цепочке. Комплексные функции накопителя данных общезаводской системы будут оказывать содействие в таких областях управления качеством, как документирование процесса и данных испытания качества, прослеживание процесса производства продукции в случае рекламации от покупателей, разработка технологического процесса, подготовка сертификатов качества. Благодаря этой системе обеспечивается бесперебойное прослеживание потока металла на всех этапах технологического

процесса, начиная от непрерывной разливки стали и заканчивая линией ее обработки. Она собирает и архивирует результаты испытаний качества, а также объединяет эти данные с документацией технологического процесса.

В качестве части разработки системы требуются специализированные алгоритмы, например для прослеживания дефектов, обнаруженных в сечении холоднокатаной полосы, до той части сляба, из которой она была изготовлена. При этом алгоритмы должны учитывать удлинение, перемотку и резку или кантовку продукции.

Совершенно очевидно, что наличие накопителя, содержащего данные каждого этапа технологического процесса, значительно облегчит разработку и оптимизацию производства в общезаводском масштабе. Такая система, разработанная с использованием технологии Интернета, откроет новые перспективы в улучшении качества продукции и существенно повысит эффективность решения всех задач, связанных с его гарантией. Разработка системы «ФАИ-Ку Дискавери» управления качеством полосы для стана горячей прокатки в 1996 – 1999 гг. стала заметной вехой в ее внедрении.

Недавно фирма «ФАИ» внедрила новую конфигурацию системы для управления технологическими процессами в непрерывной разливке стали – систему рассредоточенных модулей. Она основана на отдельных автономных системах программируемых логических контроллеров или персональных компьютеров для разных участков управления. Каждый компонент подключен к устройству сбора данных, которое объединяет отдельные установки в одну систему и обеспечивает данные для человеко-машинного интерфейса, а также для сообщения с системой автоматизации уровня L2. Блоки оборудованы специальными интеллектуальными и операционными системами и могут функционировать как автономные устройства для целей испытаний или профилактического ухода и т.п. Блоки стандартизируются и могут быть использованы в разных сочетаниях там, где требуется техническое и программное обеспечение для автоматизации оборудования. Такой подход позволяет быстро начать эксплуатацию МНЛЗ. Примерами отдельных блоков для схемы «подключайся и разливай» могут служить устройство качания кристаллизатора «Динафлекс», система гидравлического регулирования ширины кристаллизатора и автоматизации уровня L2.

Устройство качания кристаллизатора «Динафлекс» может служить в качестве автономной установки (для модернизации) или быть встроено в систему рассредоточенных компонентов. Настройка выполняется непосредственно со встроеного дисплея, который обеспечивает предварительную наладку и испытание полного устройства в цехе сборки, минимизируя таким образом испытание на рабочей площадке.

Основные характеристики системы управления устройством качания кристаллизатора – расчет задаваемых значений, генераций функций для синусоидальных и несинусоидальных значений, оперативное и автономное регулирование хода, управление качанием кристаллизатора и расчет трения. Для сбора данных и устранения неполадок устройство снабжено сервисным соединителем, который обеспечивает сводку сигналов технологического процесса для последующего анализа. В будущем предусматривается дистанционный доступ.

Устройство гидравлического регулирования ширины кристаллизатора пригодно как для новых МНЛЗ, так и для модернизации типовых кристаллизаторов с гидравлическими или электрическими приводами. Вся наладка и рабочая настройка выполняются напрямую с графического дисплея. На случай нестандартных ситуаций система управления оборудована экспертной системой, которая предназначена для корректировки ширины кристаллизатора и восстановления нормального режима работы.

Система автоматизации уровня L2 модульная, спроектирована с целью оптимизации технологического процесса и оборудована устройствами для комплексного сбора данных и выдачи информации оператору. Она включает модели процессов для динамичного вторичного охлаждения и другого технологического регулирования, а также для оптимизации выхода годного и управления качеством. Эта система показывает типичный дисплей уровня L2, на котором отражен общий обзор, включая наиболее важные данные о плавке, сталеразливочном и промежуточном ковшах и о непрерывнолитом слитке, в комбинированной текстовой и графической форме [3].

Существуют и другие системы автоматизации: система «Уровень», предназначенная для автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе с точностью до  $\pm 2$  мм; информационно-измерительные системы «Качание» и «Подвисание», служащие для определения состояния механизма качания и кристаллизатора в период эксплуатации, для индикации параметров пространственной траектории кристаллизатора, амплитуды и частоты качания, сигналов-критериев, характеризующих режим работы шлака в кристаллизаторе, условий формирования корки слитка, визуализации на мониторе оператора теплового поля поверхности слитка и распространения области прилипания корки слитка к медным стенкам. Предусмотрена одновременная подача звуковой и световой сигнализации.

Установленные на механизме качания датчики прецизионно измеряют движение кристаллизатора по трем ортогональным осям и трем углам поворота вокруг этих осей. Другие прецизионные дат-

чки измеряют силы взаимодействия кристаллизатора и слитка. Результаты текущих измерений обрабатываются компьютерной системой за период качания кристаллизатора. Информация о ходе разлива в текстовом и графическом виде отображается на экране пультов, установленных на рабочих местах разлива и оператора МНЛЗ.

Текущие результаты работы комплекса сохраняются в архиве, визуализируются на электронных носителях информации и служат базой данных, необходимой для контроля и совершенствования технологии использования имеющегося оборудования. Через эту аппаратуру происходит обмен информацией с сетью более высокого уровня. Применение системы «Уровень» позволило улучшить качество поверхности заготовок и увеличить производительность МНЛЗ на 15% за счет увеличения скорости вытягивания заготовки.

Для работы с системой «Подвисяние» устанавливаются кристаллизаторы с вмонтированными термодатчиками и системами анализа работы кристаллизаторов, благодаря которым появилась возможность прогнозирования вероятных аварийных ситуаций, связанных с уточнением толщины корки слитка. Датчики, установленные в три ряда на расстоянии 168, 280 и 430 мм от верхней кромки медных пластин, позволяют контролировать распределение температуры по стенкам кристаллизатора в ходе процесса. В случае локального разогрева стенок системой предусмотрена звуковая и световая сигнализация с указанием места подвисяния на мониторе оператора. За четыре месяца работы системы зафиксировано шестнадцать подвисяний корки слитка, из них четыре были определены технологами одновременно с системой, а в двенадцати случаях система заранее сигнализировала технологу о возникновении зависания, что позволило принять меры для исключения аварийной ситуации.

Для улучшения качества слитков и оценки работы механизма качания и кристаллизатора широкое применение получили акселерометрические системы контроля движения кристаллизатора [9 – 11]. Авторы этих работ отмечали, что отклонения от заданных режимов качания в случае неvertикального движения кристаллизатора относительно его оси, а также возникновения угловых колебаний сопровождаются воздействием горизонтальных усилий на затвердевающую корку слитка.

Качественно новая информация, которую выдает система, – это информация о взаимодействии кристаллизатора и слитка. Установленное оборудование позволяет в результате обработки измерять отдельно составляющие трения: «сухую» (без жидкой фазы шлака) и «вязкую». Это открывает возможность объективно и опе-

ративно, основываясь на измерениях, определять эффективность работы шлакообразующей смеси в кристаллизаторе в конкретных условиях разливки, подбирать оптимальные скоростные режимы и наилучшие шлакообразующие смеси. Имея определенный запас «эталонной» шлакообразующей смеси данной марки, можно контролировать вновь поставляемые партии смесей этой марки по сравнительным замерам в стационарных режимах разливки.

Система позволяет подбирать режимы движения механизма качания (частоту, форму и размах колебаний) по минимуму взаимодействия слитка и кристаллизатора. На основе измерения взаимодействия кристаллизатора и слитка предсказываются дефекты на поверхности слитка (шлаковые включения, некоторые виды трещин). Анализируя величины сигналов-критериев, можно обнаружить как небольшие отклонения от нормы, не требующие принятия каких-либо специальных мер, так и дефекты, которые вызывают необходимость дополнительной обработки поверхности заготовок.

Вся перечисленная информация, получаемая от комплекса, требует дополнительной обработки применительно к конкретным условиям разливки с целью определения числовых значений сигналов-критериев, которые определяются в результате анализа данных, получаемых при разливке, и сопоставления их с фактическими результатами работы и качеством слябов.

Одним из показателей, вырабатываемых комплексом «Кристаллизатор-2000» и указывающих на качество поверхности слитка, служит сигнал-критерий «вибрация» («шлак»). Проводили сравнительный анализ величины сигнала-критерия «вибрация» и качества поверхности литой заготовки, отобрав 678 слябов. Из них 647 слябов от 74 плавов были отлиты в условиях, когда величина сигнала-критерия «вибрация» находилась в пределах 30...100%. На поверхности этих слябов дефекты не обнаружили. При осмотре 31 сляба выявили дефекты поверхности в виде шлаковых образований. Величина сигнала-критерия «вибрация» во время отливки этих слябов составляла 101...160%.

Виброобработка стали в кристаллизаторе. Еще одним методом получения качественного слитка является вибрационное воздействие на металл в кристаллизаторе.

При вибрационном воздействии на кристаллизующийся металл происходит увеличение скорости кристаллизации, уплотнение центральной зоны заготовки, значительно уменьшается ликвация.

Механизм воздействия вибрации на кристаллизующийся металл связывают с изменением температуры кристаллизации стали при увеличении давления в случае возникновения кавитации в слое, прилегающем к виброинструменту.

Температура и давление как внешние параметры определяют устойчивость системы. Увеличение давления в локальном объеме при схлопывании кавитационной полости способствует росту температуры кристаллизации, т.е. более раннему появлению центров кристаллизации. Так, например, при повышении давления на жидкое железо на 0,1 МПа температура кристаллизации возрастает на  $3 \cdot 10^{-3}$  °С. Повышение давления при кавитации до тысяч атмосфер приводит к существенному изменению температуры кристаллизации. В области развитой кавитации давление во время схлопывания пузырька может составлять, например для воды, 1 МПа.

УралНИИчерметом совместно с Уралгипрометом и Нижнетагильским металлургическим комбинатом разработаны конструкция установки (рис. 2) и технология обработки стали вибрацией в кристаллизаторе сечением 250 × 1500 мм слябовой МНЛЗ с вводом виброинструмента в жидкий металл.

В процессе исследования обработку стали вибрацией проводили при частоте 1500...3000 колебаний в минуту и амплитуде 0,5...2,5 мм с вынуждающим усилием вибрации до 6 кН. Конструкция установки обеспечивает безопасную и безаварийную работу на рабочей площадке МНЛЗ. В качестве виброинструмента применяли специальные огнеупоры. В процессе исследования отрабатывали режим вибрации, глубину погружения виброинструмента в сталь 09Г2С, 10-15ХСНД, 28Х2М, 15К и СтЗсп. Сопоставление серных отпечатков с поперечных темплетов опытного и сравниваемого ме-

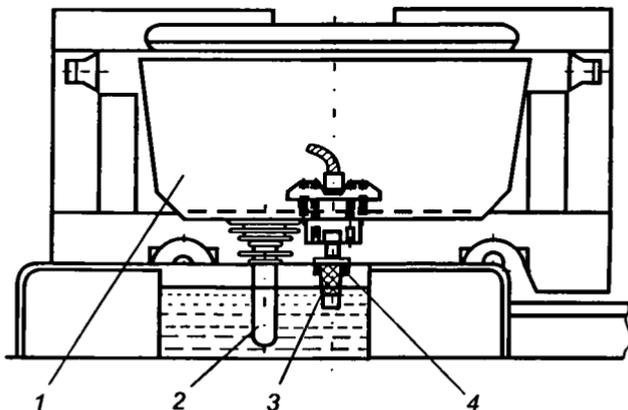


Рис. 2. Схема установки для обработки стали вибрацией в кристаллизаторе МНЛЗ:

1 – промежуточный ковш; 2 – погружной стакан; 3 – виброинструмент; 4 – держатель виброинструмента

талла (одной и разных плавок) показало значительное улучшение качества слябов, отлитых с виброобработкой металла при кристаллизации. При этом предел текучести листов толщиной 20 мм повысился на 7...8%, ударная вязкость при отрицательной температуре – на 8...9, после старения – на 8...30%.

С целью определения влияния вибрационной обработки на скорость кристаллизации стали провели исследование по известной методике. Для этого из сляба вырезали дорожки, которые подвергали горячему травлению для выявления дендритной структуры металла. По расстоянию между осями дендритов второго порядка вычисляли скорость кристаллизации на различном расстоянии от края широкой грани сляба. Увеличение скорости кристаллизации выше в зоне металла, примыкающей к виброинструменту.

Возмущение и внутренние волны передаются по всему объему кристаллизатора, что подтверждают результаты исследования процесса кристаллизации с использованием в качестве модельной жидкости салола.

Промышленные исследования показали, что виброобработка стали в кристаллизаторе МНЛЗ позволит увеличивать скорость ее кристаллизации на 25...63%; при этом центральная зона слябов затвердевает с высокой степенью объемной кристаллизации.

По включениям оксидов и нитридов опытный металл отличается от обычного незначительно.

Влияние вибрации проявилось в изменении характера сульфидной фазы. В опытном металле отмечается снижение количества пленочных сульфидов и растет доля строчечных сульфидных включений, состоящих из отдельных глобулей. Крупные пленочные сульфиды при вибрации кристаллизующегося металла имеют тенденцию к их разрушению и превращению в бусообразные строчки.

Таким образом, при обработке стали путем вибрации снижается доля мелких ( $< 2$  мкм) глобулярных сульфидов и в результате их вероятной коалесценции возрастает доля более крупных (2...4 мкм) включений. Снижается газонасыщенность стали, особенно в центральной зоне сляба: содержание кислорода и водорода уменьшается соответственно на 10...20 и 14...29%; концентрация азота изменяется незначительно [12].

Приведенные в данной работе новые технологии целесообразно применять при реконструкции действующих и строительстве новых МНЛЗ, в том числе и в условиях РУП «БМЗ». Применение рассмотренных технологий позволит увеличить скорость разливки, а также улучшить качество непрерывнолитой заготовки без значительной переделки МНЛЗ и больших капитальных вложений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Harry, R.C.* // Elec. Furnace Conf. Proc. Dallas. 1988. V. 44. P. 63 – 71.
2. *Suzuki, A.* [et al.] // Steelmaking Conf. Proc. Toronto, Ontario, Canada. 1988. V. 71. P. 125 – 131.
3. *Евтеев, Д. П.* Непрерывное литье стали / Д.П. Евтеев, И.Н. Колыбалов. М.: Металлургия, 1984. 200 с.
4. *Толве, Р.* Внепечная обработка расплава в промежуточном ковше МНЛЗ / Р. Толве, А. Прайтона, В. Рамагиотти // Стил тайме интернешнл. 1987. С. 128 – 134.
5. Плазменная система для нагрева стали в промежуточном ковше. Доклад фирмы «Тетроникс» // Стил тайме интернешнл. 1989. 25 с.
6. Нагрев стали разрядом постоянного тока на установках внепечной обработки / Г.Н. Окорочков [и др.] // Сталь. 1994. № 2. С. 36 – 40.
7. *Окорочков, Г. Н.* Дуговые сталеплавильные печи за рубежом: Новости черной металлургии за рубежом // Ин-т «Черметинформация». 1995. Вып. 1. С. 48 – 54.
8. Технологические особенности выплавки стали в дуговых печах постоянного тока и перспективы их использования / Г.Н. Окорочков [и др.] // Сталь. 1994. № 5. С. 24 – 30.
9. Возможности автоматического предупреждения о прорывах на выходе из кристаллизатора / С.М. Чумаков [и др.] // Сталь. 1998. № 5. С. 22 – 26.
10. *Чумаков, С. М.* Опыт использования акселерометрической системы технологического контроля кристаллизатора / С.М. Чумаков, А.Н. Сорокин // Сталь. 1998. № 6. С. 17 – 19.
11. Трение между заготовкой и кристаллизатором при разливке стали на МНЛЗ / Э. Ферстер [и др.] // Черные металлы. 1994. № 2/3. С. 34 – 41.
12. Виброобработка стали в кристаллизаторе МНЛЗ – перспективный способ улучшения качества заготовок / В.А. Денисов [и др.] // Сталь. 1993. № 5. С. 32 – 34.

УДК 621.074

И.В. ЗЕМСКОВ, канд. техн. наук,  
Г.И. СТОЛЯРОВА, И.К. ФИЛАНОВИЧ (БНТУ)

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Исследование процесса и разработку технологии вертикального непрерывного литья заготовок из сплавов на основе меди производили для безоловянных бронз (Бр А9ЖЗЛ, Бр С30), оловянных бронз (Бр О5Ц5С5) и латуней (ЛЦ40С).

Методика исследований предполагала проведение всех экспериментов в условиях, максимально приближенных к производственным: плавка металла – в высокочастотной индукционной печи, получение отливок – на лабораторной установке полупромышленного типа. Температурный режим кристаллизатора изучали методом анализа температурных полей всей системы, участвующей в тепло-