

Система управления качеством непрерывнолитых заготовок

*В.Ю. Авдонин, Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Е.П. Парфёнов, Л.Г. Корзунин, А.Б. Дернягин,
А.А. Смирнов, ООО "Уралмаш–Металлургическое оборудование", г. Екатеринбург*

Современные требования к МНЛЗ включают разработку системы управления качеством, т.е. такой системы, которая позволяет наилучшим образом реализовать все конструктивные и технологические возможности, заложенные в МНЛЗ ее создателями. Она должна обеспечивать не только реализацию технологии непрерывной разливки, но и регистрировать и устанавливать взаимосвязь параметров, характеризующих качество (балльность трещин, вид дефектов, их количество и т.д.) с различными параметрами, характеризующими процесс непрерывного литья, такими как температура жидкого металла, его химический состав, скорость литья, амплитудно-частотные характеристики механизма качания кристаллизатора, расходы охладителя по зонам вторичного охлаждения и на оборудование (кристаллизатор, ролики, роликовые опоры и пр.) и многими другими. Установление такой причинно-следственной связи должно быть оперативным и позволять эксплуатационному персоналу принимать правильные решения в ходе процесса литья, а также корректировать технологию. Эти решения могут касаться как управления уровнем металла в кристаллизаторе или корректировки границ участка мягкого обжатия, так и усовершенствования системы охлаждения заготовок или химического состава шлакообразующих смесей. Создание таких систем осуществляется на базе математического моделирования технологического процесса, адаптированного к управляющей системе автоматизации конкретной МНЛЗ.

Современное управление качеством заготовок требует:

- максимального учета всех значимых для качества факторов,
- обеспечения взаимодействия и обратной связи всех составляющих управляющего комплекса с фактическими параметрами, характеризующими технологический процесс, непрерывно изменяющимися во время разливки.

Для решения этой задачи в ООО «Уралмаш-Метоборудование» разработана система управления качеством заготовок, включающую три подсистемы:

- динамическая система вторичного охлаждения (ДСВО),
- система мягкого обжатия (СМО),
- автоматизированная система прогнозирования качества слитка (ПКС),

объединенные в единый автоматизированный программно-аппаратный комплекс АСУ ТП. Взаимодействие составных частей системы иллюстрируется схемой на рис.1, из которой видна взаимосвязь различных модулей подсистем. Две из подсистем - ДСВО и СМО отвечают за технологию, а третья - ПКС, основанная на "самообучающейся" программе сбора и анализа технологических данных, отвечает за контроль качества и выдает информацию для принятия эксплуатацией решений по устранению причин брака.

Динамическая модель системы вторичного охлаждения слитка на МНЛЗ.

Система ДСВО фирмы «Уралмаш-Метоборудование», основанная на модели «EKSPRESS» [1-8], поддерживает температурный профиль заготовки вдоль технологического канала МНЛЗ, отслеживает толщину корки и глубину лунки жидкой фазы в динамических режимах работы машины. В отличие от моделей других фирм, осуществлен подход к решению проблемы быстрого действия при работе ДСВО, при котором определение температурного профиля слитка в реальном времени производится без решения дифференциального уравнения теплопроводности на каждом временном шаге срабатывания системы. На данную разработку получены патенты Российской Федерации [6,7]. ДСВО внедрена на МНЛЗ-3 и МНЛЗ-2 ОАО ММК совместно с ООО «ДАТА-ЦЕНТР».

Запатентованный быстрый алгоритм «EKSPRESS» [6,7], включает 2 модуля: «Модуль ДСВО-1», обеспечивающий динамическое регулирование расходов вторичного охлаждения и «Модуль ДСВО-2», обеспечивающий динамическое слежение за положением «зумпфа».

Особенности модели «EKSPRESS» и алгоритма ДСВО фирмы «Уралмаш-Металлургическое оборудование» :

- отслеживает в реальном времени тепловой профиль, толщину корки заготовки и положение зоны мягкого обжата;
- учитывает реальный скоростной режим разливки, включая переходные режимы, марочный состав стали, задаваемую интенсивность охлаждения (три режима), температуру перегрева жидкого металла в промковше, теплосъем в кристаллизаторе, разогрев МНЛЗ (фактор холодного старта машины в начале серии плавок);
- оптимально управляет расходами охладителя для обеспечения постоянства теплового профиля при изменении скоростного режима разливки;
- обеспечивает быстрое реагирование на изменение скорости литья с частотой съема показаний 200миллисекунд;
- калибровка модели осуществляется во время пуско-наладочных работ при помощи пирометров спектрального отношения.

Модель «EKSPRESS» позволяет учитывать историю кристаллизации непрерывнолитой заготовки и наиболее полно реализовать отсутствие вторичных разогревов и переохлаждений заготовки при изменении скоростного режима.

Модуль динамического управления расходами охладителя

Для управления вторичным охлаждением в динамическом (нестационарном) режиме разливки массив конвективных коэффициентов теплоотдачи обрабатывается в виде функции:

$$\bar{\alpha}_{j,m} = f(v, L_j) \quad (1)$$

При переходных режимах используется зависимость [6]:

$$\alpha_j(\tau) = \alpha_{1j} + (\alpha_{2j} - \alpha_{1j}) \cdot \left[1 - \left(\frac{\tau'' - \tau}{\tau_{II}} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}}, \text{ при } \tau' \leq \tau \leq \tau'', \quad (2)$$

где $k = 1,5$ – при снижении скорости; $k = 1,25$ – при повышении скорости; τ' , τ'' – время начала и конца переходного процесса; $\tau_{II} = \tau'' - \tau'$.

Время переходного процесса определяется как:

$$\tau_{II} = \left(\frac{\bar{L}_j}{v_2} \right)^n, \quad (3)$$

где L_j – расстояние от мениска металла до середины j -ой зоны охлаждения, м; v_2 – конечная скорость переходного процесса, м/мин; при увеличении скорости $n = 1$, при уменьшении скорости $n = 1...0,5$ в зависимости от отливаемой марки стали.

Алгоритм применим в пределах технологически используемых скоростей разливки для конкретной машины.

Модуль слежения за положением конца лунки жидкой фазы

Критерием расположения зоны мягкого обжата являются места прохождения следующих изотерм: начало зоны мягкого обжата - изотерма – $T_{0,7}$; конец зоны мягкого обжата - изотерма – $T_{0,3}$, где $T_{0,3}$ и $T_{0,7}$ – изотермы соответствующих содержанию 30% и 70% жидкого металла в двухфазной зоне.

В квазистационарном режиме для разливаемого марочного сортамента сталей во всем диапазоне скоростей разливки рассчитывается расположение от мениска начала и конца зоны мягкого обжата в зависимости от скорости вытягивания слитка, перегрева жидкого металла и режима охлаждения в ЗВО. Полученные зависимости аппроксимируются полиномами с применением методов регрессионного анализа.

$$\bar{L}_{0,7} = f(v, \Delta T), \quad \bar{L}_{0,3} = f(v, \Delta T) \quad (4), (5)$$

где v - скорость разливки м/мин; ΔT – перегрев жидкого металла над температурой ликвидуса. При переходных режимах используется зависимость, аналогичная (2), но только для функций (4) и (5).

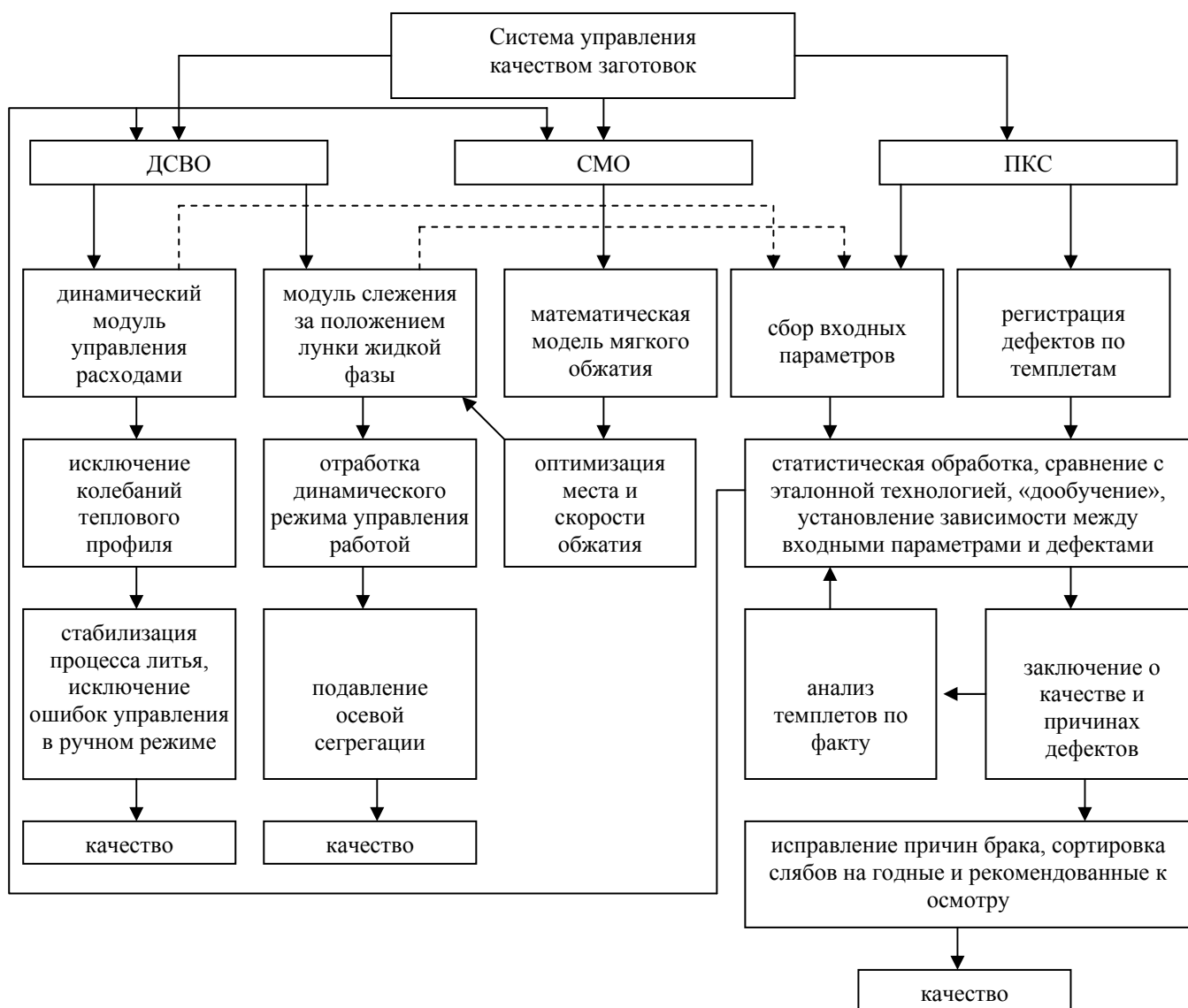


Рис. .1. Схема системы управления качеством заготовок

Процедура организации управляющего расходами охладителя алгоритма следующая. В переходных режимах коэффициенты теплоотдачи определяются с использованием методов регрессионного анализа как функции скорости литья и расстояния от мениска. Для переходных режимов значения этих коэффициентов изменяются по определенному закону с учетом скоростей переходного режима и его продолжительности. При этом непрерывно вычисляются расходы воды и воздуха по аппроксимационным зависимостям, связывающим коэффициенты теплоотдачи с расходными характеристиками форсунок. Эти зависимости устанавливаются на основе статистической обработки результатов стендовых испытаний форсунок с использованием планирования эксперимента. Для учета перегрева жидкого металла, влияния теплоотвода в кристаллизаторе и фактора “холодной машины” расходы воды корректируются с использованием специальных коэффициентов. Эти коэффициенты определяются в свою очередь по результатам серии расчетов, моделирующих действие указанных факторов. Следует отметить, что для каждой конкретной МНЛЗ создается своя собственная модель ДСВО, учитывающая ее конструктивные

особенности, а также особенности сортамента и химического состава разливаемых сталей. Созданию ее предшествует большая расчетная работа.

На рис.2 приведено сравнение результатов ручного и динамического управления расходами на МНЛЗ-3 ММК.

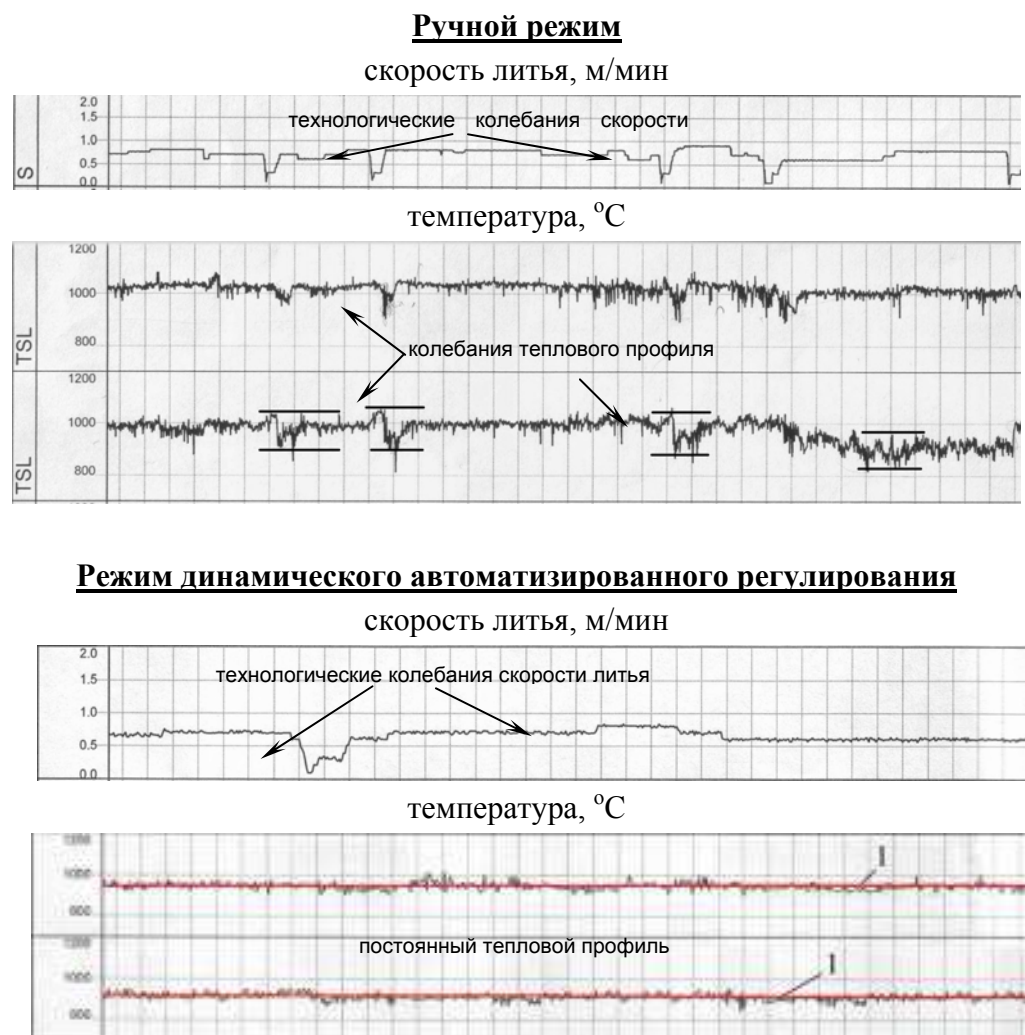


Рис.2. Сравнение результатов ручного и автоматизированного динамического управления расходами на МНЛЗ №3 Магнитогорского металлургического комбината (1 – заданные тепловые профили широкой грани в местах установки пирометров).

Система "мягкого обжатия"

Система применяется для нейтрализации негативных явлений порообразования и ликвации в конце зоны затвердевания. Система мягкого обжатия включает средства для осуществления мягкого обжатия: гидрофицированные роликовые сегменты и средства АСУ ТП для реализации управления технологическим процессом мягкого обжатия. Разработка управляющих алгоритмов верхнего и базового уровней управления, а также настроек позиционирования осуществляется с использованием базовой математической модели мягкого обжатия, включающей модель тепломассопереноса с учетом гидродинамики "CRISTALL" и деформационную модель «Обжатие», /8/.

Модель "CRISTALL" основана на квазиравновесной модели кристаллизации слитка с учетом гидродинамических процессов в двухфазной зоне затвердевания. Эта модель включает уравнение теплопроводности, диффузии, сплошности расплава и сохранения импульса. Замыкает систему уравнений уравнение состояния (условие квазиравновесия), связывающее температуру расплава и концентрацию легирующих элементов. В математическую модель введены представления о проницаемости двухфазной зоны и прочности расплава, позволившие описать

гидродинамические эффекты в двухфазной зоне и механизм образования пор. Модель описывает взаимодействие таких процессов и явлений, как теплопроводность, диффузия, мягкое обжатие, усадочный процесс, конвекция, образование пористости.

Модель определяет границы участка мягкого обжатия и необходимую величину сближения фронтов кристаллизации.

Следует отметить, что именно величина сближения фронтов ответственна за эффективность мягкого обжатия, в то время, как единственной контролируемой величиной в процессе литья, которая участвует в отработке позиционирования, является перемещение штоков гидроцилиндров, что обычно отождествляется с величиной уменьшения раствора роликов. В действительности, расчеты показывают, что в зависимости от жесткости сегментов и корки непрерывнолитой заготовки эти величины не совпадают. При одинаковой величине хода штоков для двух сегментов различной жесткости сближение фронтов в зоне мягкого обжатия будет различным. При этом в одном случае величина сближения фронтов может быть недостаточной для достижения эффекта мягкого обжатия, а в другом - чрезмерной, приводящей к неблагоприятному деформированию корки непрерывнолитой заготовки с образованием растягивающих деформаций в направлении ширины заготовки, которые могут быть причиной образования трещин, перпендикулярных широкой и узкой граням.

Математическая модель «Обжатие» представляет методологию расчета величин позиционирования гидрофицированных сегментов мягкого обжатия, обеспечивающих реализацию гидродинамической работы фронтов кристаллизации (т.е. нужного сближения фронтов кристаллизации, рассчитываемого по программе «CRISTALL»), необходимой и достаточной для поддержания гидродинамического давления в двухфазной зоне с целью обеспечения непрерывного движения жидкого расплава к границам кристаллизации дендритов для подавления порообразования при усадке. Основой для расчетных исследований является твердотельная модель сегмента мягкого обжатия, представляющая твердотельную объемную модель, включающую траверсу с роликами, выполненную в САД-пакете Solid Works. Решение задачи осуществляется в пакете ANSYS в объемной контактной упруго-пластической постановке с использованием закона текучести Прандтля - Райса с кинематическим упрочнением. Учитывается зависимость физических и механических свойств от температуры при скоростях деформации 10^{-2} - 10^{-5} 1/сек. Такая постановка и модель позволяют с большой точностью воспроизвести условия совместного деформирования заготовки и роликового сегмента с учетом реальных жесткостей контактирующих объектов. Расчет напряженно-деформированного состояния дает исчерпывающее представление о процессах деформирования, происходящих в зоне мягкого обжатия как в непрерывнолитой заготовке, так и в элементах конструкции сегментов. Такой расчетный анализ позволяет не только максимально приближенно к реальности виртуально воспроизвести процесс, но на основании количественной оценки величин напряжений и деформаций прогнозировать последствия применения тех или иных параметров мягкого обжатия, например, величины сближения роликов, зоны приложения усилия обжатия, что позволяет наиболее рационально и правильно выбрать технологические параметры мягкого обжатия и выдать рекомендации на проектирование конструкции сегментов для реализации технологии.

Величина обжатия очень дифференцирована по сортаменту, например, одинаковые перемещения фронтов кристаллизации для блюмовой и слябовой заготовок требуют существенно различных величин обжатия в парах роликов, больших для обжатия блюмовых заготовок.

Базовая модель требует значительных ресурсов вычислительной техники и по этой причине не применяется для управления в реальном времени. Она является основой создания быстрых алгоритмов для слежения за положением зоны мягкого обжатия, расчета настроек позиционирования для верхнего и базового уровней управления и осуществления процедуры управления позиционированием гидрофицированных сегментов мягкого обжатия.

Автоматизированная система прогнозирования качества слябов (АС ПКС)

АС ПКС разработана совместно специалистами ООО «Уралмаш-Метоборудование» и ООО «ДАТА-ЦЕНТР». Эта система позволяет установить взаимосвязь параметров, характеризующих качество металла заготовок на выходе с параметрами, характеризующими процесс непрерывного литья на входе: температура жидкого металла, частота качания кристаллизатора, уровень металла в кристаллизаторе и др. Результатом ее работы является оперативная корректировка процесса литья как в ходе разлива, так и принятие мер по устранению причин брака эксплуатационного, технологического или конструктивного характера.

АС ПКС является замыкающей составной частью комплексной программы управления качеством заготовок, отливаемых на МНЛЗ. Она осуществляет автоматизированное прогнозирование качества каждой отрезанной от непрерывного слитка заготовки и выдачу заключения об ее годности: «ГОДЕН» - для использования по заказу без предварительного осмотра, или «ОСМОТР» - если прогнозируются отклонения от стандартного качества для заготовок данного заказа по видам дефектов. В настоящее время в системе используются следующие виды дефектов – «поверхностный» дефект, «неметаллические включения», дефект по «макро». Однако при необходимости список их может быть дополнен или изменен.

Принцип работы АС ПКС – применение экспертной системы, которая использует набор правил для принятия решения по каждой заготовке, исходя из сведений обо всей ее предыстории, начиная от выплавки стали, ее промежуточной обработки, данных о стальковше и промковше, заканчивая разливкой в кристаллизатор, вторичным охлаждением, работой системы вытягивания с учетом ее настройки и скоростных режимов.

Экспертная система ПКС (ЭС ПКС) включает следующие компоненты: машина логического вывода, выполняющая функцию оценивания качества слитка; механизм объяснений, позволяющий технологу запросить у ЭС обоснование результатов прогнозирования; модуль дообучения, обеспечивающий анализ и модификацию моделей прогноза качества; модуль извлечения знаний, предназначенный для формирования обучающих выборок на основании данных о процессе плавки и данных темплетной лаборатории; база знаний, содержащая в себе модели прогноза качества и обучающие выборки.

Обучение системы производится на основании обучающих выборок, представляющих собой серию интервалов плавки, для которых известна информация о фактических отклонениях процесса плавки и фактическом качестве слитков. Для решения задачи о прогнозировании качества сляба определяются числовые зависимости между отклонениями и дефектами. Совокупность найденных зависимостей представляет собой модель прогноза качества.

Правила формируются системой автоматически (первичное обучение) путем компьютерной переработки данных о формировании каждого сляба и результатов анализа качества слябов, поступающих из темплетной лаборатории, а также от АСУ ТП последующих стадий передела, на которых могут проявиться дефекты. Помимо автоматического формирования правил предусмотрена возможность их анализа и пополнения технологом, для чего разработан удобный пользовательский интерфейс.

Система обеспечивает автоматизированный сбор данных от агрегатов ККЦ, подсистем МНЛЗ и темплетной лаборатории. Важной особенностью является *автоматическое дообучение* системы в процессе наработки новых вариантов взаимосвязи входных и выходных регистрируемых параметров. По мере накопления новой информации в период работы МНЛЗ, используемые правила корректируются с целью получения более точного решения по каждому отливаемому слябу.

Главное достоинство системы - прогноз пригодности заготовок без их предварительного осмотра, при этом сокращаются трудозатраты на контроль и повышается его качество, который осуществляется непрерывно, а не дискретно путем анализа отобранных темплетов. Появляется возможность встраивания МНЛЗ в непрерывные технологические потоки с прокатным производством, т.к. непрерывнолитые заготовки гарантированно обладают требуемым качеством. Использование ПКС в составе автоматизированной системы управления качеством заготовок

способствует улучшению качества заготовок в целом, увеличивает производительность МНЛЗ и выход годного металла, улучшает условия труда эксплуатационного персонала.

Описанная система управления качеством заложена в проект реконструкции двухручьевого слябовой МНЛЗ №2 ОАО «Северсталь» производительностью 2,5 млн. т в год. Пуск и наладка и указанной системы будут осуществляться в 2006 г.

Список использованных источников

1. Парфенов Е.П., Смирнов А.А., Кошкин А.В., Корзунин Л.Г. Динамическая система вторичного охлаждения для машины непрерывного литья заготовок // *Металлург*. 1999. №11. С. 53-54.
2. Парфенов Е. П., Лобанов Е.П., Карлинский С.Е., Смирнов А.А., Айзин Ю.М., Куликов В.И. Автоматическое управление системой водовоздушного охлаждения сляба на МНЛЗ // *Конструирование, расчет и исследование МНЛЗ криволинейного типа: Сб. / Свердловск: УЗТМ*. 1989. С.142-148.
3. Парфенов Е.П., Смирнов А.А., Антонов А.А. Вторичное охлаждение непрерывнолитых заготовок в переходных режимах: Труды второго конгресса сталеплавателей / М. 1994. С. 317-318.
4. Парфенов Е.П., Смирнов А.А. Об управлении вторичным охлаждением слитка при работе МНЛЗ по динамическому режиму // *Сталь*. 1996. №7. С.21-22.
5. Парфенов Е. П., Смирнов А. А. // *Сталь*. 1996. №7. С. 21-22.
6. Патент РФ №2185927 от 18.10.1999г. кл. 7 В 22 D 11/22, /Кошкин А.В., Парфенов Е.П., Лобанов Е.П., Смирнов А.А., Куроедов В.Д., Маевский В.В., опублик. 27.07.2002г. Бюл. №21.
7. Патент РФ №2243062 от 04.11.2003г. кл. 7 В 22 D 11/22, /Авдонин В.Ю., Парфенов Е.П., Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Смирнов А.А., опублик. 27.12.2003г. Бюл. №36.
8. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П., Юровский Н.А., Авдонин В.Ю. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. - 320 с.

Аннотация

Система управления качеством непрерывнолитых заготовок. В.Ю. Авдонин, Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Е.П. Парфёнов, Л.Г. Корзунин, А.Б. Дернягин, А.А. Смирнов.

Система управления качеством непрерывнолитых заготовок включает три подсистемы: две технологических – динамическую систему вторичного охлаждения (ДСВО) и систему мягкого обжатия (СМО), которые на базе математического моделирования процессов кристаллизации и мягкого обжатия обеспечивают рациональные технологические режимы непрерывного литья заготовок, направленные на повышение качества; третья подсистема – автоматизированная система прогнозирования качества слитков (АС ПКС) на основе автоматизированного непрерывного сбора данных с агрегатов ККЦ и подсистем МНЛЗ осуществляет расчетный прогноз качества заготовок. Принцип экспертной оценки и самообучения, лежащий в основе ПКС, позволяет установить взаимосвязь между входными параметрами, характеризующими технологический процесс литья и эксплуатационное состояние оборудования, с характеристиками качества. Такой комплексный подход позволяет управлять качеством непрерывнолитых заготовок.

Система управления качеством заложена в осуществляемый ООО «Уралмаш-Метоборудование» проект реконструкции двухручьевого слябовой МНЛЗ №2 ОАО «Северсталь» производительностью 2,5 млн. т в год. Пуск и наладка и указанной системы будут осуществляться в 2006 г.

Статья опубликована в Сборнике трудов конференций и семинаров Недели металлов в Москве 14-18 ноября 2005 г.