

УДК 669.013:669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ МИКРОЗАВОДОВ

Показаны отличия технологической схемы производства стали в условиях металлургических микрозаводов в сравнении с интегрированными предприятиями. Предложены подходы к организации согласованной работы основных технологических агрегатов. Разработана система динамического управления охлаждением непрерывнолитой заготовки. Предложенный алгоритм и технология управления расходом воды обеспечивают существенное снижение температурного градиента по поверхности заготовки даже в условиях частого и ступенчатого изменения скорости разливки.

Ключевые слова: микрозавод, непрерывная разливка, заготовка, скорость разливки, вторичное охлаждение, оптимизация, вода, расход, динамическое управление, температура поверхности.

В настоящее время для ведущих мировых производителей металлопродукции характерно создание микрозаводов, представляющих собой высокоэффективные технологические построения. Такие предприятия обеспечивают оптимизацию расходов сырья и материалов, снижение удельных капиталовложений, энергозатрат и числа факторов, негативно влияющих на окружающую среду. Кроме того, современные микрозаводы ориентированы на максимально возможное использование местных инфраструктуры, рынков сбыта и трудовых ресурсов, а их эффективность во многом определяется использованием региональной сырьевой, материальной, энергетической и топливной базы.

Как правило, конкурентоспособность микрозаводов обеспечивается производством продукции массового спроса ограниченного сортамента (например, строительная арматура) либо, наоборот, специализацией на производстве высококачественной продукции ограниченного спроса (сортовой прокат машиностроительного назначения, качественная катанка и т. д.) с высокой добавленной стоимостью.

При наличии соответствующих технологий и оборудования микрозавод может производить практически любые виды продукции, которые пользуются спросом на рынке металлопродукции. Поэтому технологиче-

ские схемы металлургических микрозаводов в зависимости от конкретных условий могут трансформироваться от простых узкоспециализированных однниточных с ограниченным сортаментом продукции до сложных универсальных и многовариантных.

Наибольшее распространение в металлургии получили микрозаводы с «классическим» построением, включающим дуговую сталеплавильную печь (ЭДП с массой плавки 10–20 т), агрегат ковш-печь (АКП) для доводки стали, а также одно- или двухручьевую сортовую (блюмовую) МНЛЗ [1].

На наш взгляд, ключевыми элементами, обеспечивающими эффективность и рентабельность работы такого завода, является функционирование АКП для внепечной обработки и компактной радиальной МНЛЗ для непрерывной разливки малых объемов стали.

Технология непрерывной разливки стали и используемое для её реализации оборудование в условиях микрозаводов имеют существенные отличия от аналогов, применяемых на интегрированных предприятиях.

Наиболее существенные концептуальные различия в технологии имеют место в подходах к производительности МНЛЗ.

Для интегрированных производств повышение скорости разливки и, соответственно, производительности МНЛЗ зачастую является наиболее важным фактором, существенно влияющим на себестоимость.

В условиях микрозаводов такие подходы к скорости разливки не всегда оправданы и реализуемы, а на первый план, как правило, выходят требования к качеству и эксклюзивности продукции. Микрозаводы, реализующие стратегию производства небольших объёмов эксклюзивной продукции, имеющей повышенный спрос и высокую добавленную стоимость, не всегда заинтересованы в повышении производительности, а иногда снижение объёмов реализации их продукции на рынке позволяет сохранить или поднять уровень сложившихся цен при обеспечении приемлемой рентабельности производства.

Для согласования работы технологических агрегатов, обеспечения серийной разливки, повышения выхода годного и снижения издержек в условиях микрозаводов необходимо варьирование скорости разливки в широком диапазоне, а иногда и разливка стали с минимально возможной скоростью. Это требует новых подходов к организации технологии и в первую очередь вторичного охлаждения заготовок.

Поэтому основная цель представленной работы заключалась в разработке алгоритма и оптимизации вторичного охлаждения стали, разливаемой на МНЛЗ металлургических микрозаводов.

Как было отмечено выше, в технологической схеме микрозаводов используются компактные МНЛЗ. Это обусловлено в первую очередь стремлением сократить площади, занимаемые оборудованием, а также отсутствием необходимости в производстве больших крупнотоннажных заготовок.

Компактность сортовой радиальной МНЛЗ достигается, прежде всего, благодаря уменьшению базового радиуса машины (величина радиуса 3,5–4,0 м). Как правило, радиус сортовых МНЛЗ для микрозаводов и протяжённость главной технологической линии оказывается в 2–2,5 раза меньше, чем высокопроизводительной сортовой МНЛЗ (например, современного мини-завода). Это оказывается возможным за счёт уменьшения скорости вытяжки за-

готовки до 1,5–2,0 м/мин и менее. Для сравнения: на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ скорость вытяжки достигает 5–6 м/мин.

Основу успешного функционирования микрозаводов обеспечивает выбор рациональной схемы непрерывной разливки и оптимального количества ручьёв для сортовых и блюмовых МНЛЗ при условии увеличения серийности разливки (без остановки машины) [2]. По оценкам различных экспертов, средняя годовая производительность одного ручья для современных сортовых МНЛЗ составляет 200–250 тыс. т/год, а блюмовых — 135–140 тыс. т/год [3]. Это создаёт благоприятные условия для применения в структуре микрозаводов одноручьевых МНЛЗ. Соответственно, стоимость одноручьевой МНЛЗ в любом случае будет в 1,5–1,6 раза ниже, чем у двухручевой.

Использование преимущественно одноручьевых МНЛЗ в условиях металлургических микрозаводов значительно повышает надёжность работы всех их технологических узлов как при разливке одиночными плавками, так и при серийной разливке.

Следовательно, при разработке концепции производства стали на микрозаводах, производительность которых не превышает 100–150 тыс. т/год, должна решаться задача обеспечения стабильного процесса литья на одноручьевых МНЛЗ при подаче стали от плавильного агрегата малыми порциями. Стабильные условия разливки и качество производимой продукции достигаются в этом случае в широком диапазоне скоростей литья (1,0–7,0 м/мин для сортовых и 0,2–1,0 м/мин для блюмовых МНЛЗ).

Определённого сокращения издержек на производство стали удаётся достигнуть при согласованной работе дуговых сталеплавильных печей и МНЛЗ для обеспечения серийной разливки. Практика работы предприятий с плавильными агрегатами, а следовательно, и сталеразливочными ковшами до 10–15 т выявила проблему в организации серийной непрерывной разливки. Это связано с необходимостью совмещения длитель-

ности циклов подачи ковшей на МНЛЗ и их разливки, которые зависят от целого ряда организационных и технологических факторов и в первую очередь обусловлены малой ёмкостью сталеразливочного и промежуточного ковшей, а соответственно, и длительностью цикла разливки, который не всегда удаётся синхронизировать с циклом выплавки стали в ЭДП. Поэтому для многих микро-заводов характерна непрерывная разливка одиночными плавками либо небольшими сериями по 2–3 ковша, что приводит к большим потерям стали (3,5–4,5 %) и нарушает нормальную ритмичность работы электросталеплавильного цеха. Попытки разливки стали более длинными сериями показали, что для этого необходимо варьировать скорость вытяжки заготовки в достаточно широком диапазоне, а при необходимости разливать сталь на минимальных скоростях. Наряду с обеспечением высокого качества заготовки низкие скорости разливки позволяют максимально синхронизировать работу плавильных агрегатов и МНЛЗ, а следовательно, обеспечить разливку методом «плавка на плавку», что приводит к увеличению выхода годного и снижению себестоимости продукции. Однако при малой массе плавки в ковше (6–20 т) и ритмичности подачи ковшей 60–90 мин для серийной разливки становится необходимым варьировать скорость вытягивания заготовки от 0,1–0,2 до 0,8–0,9 м/мин, что приводит к дополнительным потерям тепла в промежуточном ковше и при переливе из него в кристаллизатор.

Между тем на предприятиях, работающих с крупнотоннажными агрегатами, проблема синхронизации дискретных циклов выплавки стали и её непрерывной разливки решается использованием АКП. Однако эти агрегаты не всегда удаётся эффективно вписать в технологическую схему металлургических микрозаводов, что в немалой степени связано с невозможностью организации эффективного дугового подогрева при значительной скорости охлаждения стали в малых сталеразливочных ковшах.

При использовании плавильных агрегатов малой ёмкости (до 10 т) проблематичным является применение традиционных агрегатов для внепечной обработки стали, а для сталеразливочных ковшей 15–30 т наблюдается повышенный износ футеровки вследствие воздействия на неё дуг электродов при обработке на АКП.

Анализ технологии непрерывной разливки блюмов в условиях одного из микрозаводов показал, что в процессе серийной разливки даже одной марки стали варьирование скорости вытяжки заготовки может происходить в пределах 0,2–0,6 м/мин. Такой широкий диапазон изменения скорости вытяжки заготовки требует дополнительной корректировки интенсивности охлаждения в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). В противном случае отдельные участки непрерывнолитой заготовки будут охлаждаться с различной интенсивностью, что может приводить к снижению качества непрерывнолитого металла по внутренним дефектам [3].

Поэтому для обеспечения стабильности процесса разливки длинными сериями актуальной задачей является коррекция интенсивности охлаждения заготовки в ЗВО непосредственно в процессе литья, что может быть реализовано с использованием оперативной системы управления режимами охлаждения заготовки, учитывающей происходящие изменения в технологии литья в режиме текущего времени.

В практике управления процессами затвердевания непрерывнолитой заготовки известны два основных подхода: пропорционально-скоростной и динамический режимы управления [3, 4].

Пропорционально-скоростной режим управления является наиболее распространённым для сортовых МНЛЗ. Он базируется на использовании табличных данных изменения расхода воды в зависимости от скорости разливки. При этом изменение расхода воды происходит во всех секциях ЗВО одновременно с изменением реальной скорости разливки. Технологическая база табличных данных или управ-

ляющих уравнений составляется для всего сортамента разливаемой продукции с учётом типоразмера, химического состава и температур разлива стали. Скоростной режим управления позволяет достаточно точно поддерживать необходимый температурный профиль при стационарном режиме разлива. Однако неотъемлемой частью технологии непрерывного литья являются переходные режимы, обусловленные, прежде всего, изменением скорости разлива, что вызывает появление переохлаждённых или перегретых участков непрерывнолитой заготовки вследствие одновременного изменения расхода охлаждающего во всех секциях и может быть причиной образования трещин, внутренних мостов и, в конечном счёте, снижения качества продукции. Следовательно, такая схема управления может эффективно работать только в небольшом диапазоне изменения скорости вытяжки (0,1–0,15 м/мин).

Динамический режим управления процессом охлаждения в ЗВО широко используется при непрерывной разливке качественных сталей и позволяет свести к минимуму негативное воздействие переходных процессов на температурный профиль непрерывнолитой заготовки. В металлургической практике известны различные алгоритмы динамической системы управления. Базовым параметром для всех алгоритмов является средняя скорость движения непрерывнолитой заготовки вдоль технологической оси. При изменении скорости вытяжки происходит монотонное изменение расхода воды автономно по каждой секции. Технологическая база данных, используемая для реализации алгоритма, представляет собой управляющие уравнения, полученные на основе математической модели, описывающей процессы затвердевания непрерывнолитой заготовки [5–8].

Средняя скорость движения заготовки v_{cp} оценивается в средней точке каждой секции ЗВО (рис. 1). Для того чтобы в начале разлива определить данную скорость для каждой секции, необходимо расстояние от нача-

ла секции до её середины поделить на целое количество равных единичных участков длиной Δl_s (s — номер секции ЗВО).

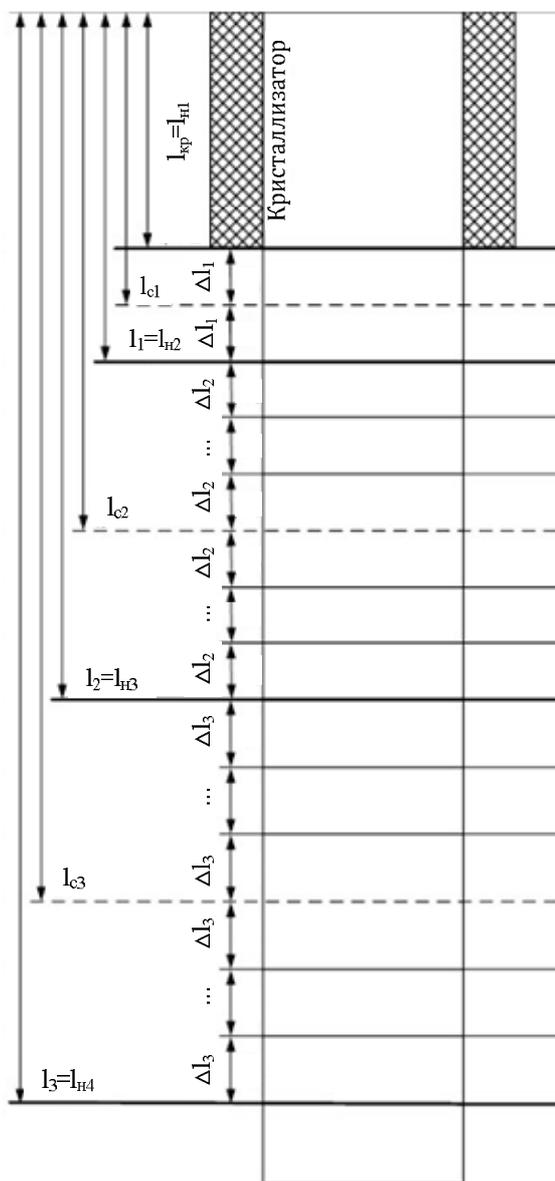


Рисунок 1 Схема размещения участков секций ЗВО

Исходя из вышесказанного, разбивку секций ЗВО можно осуществить с помощью следующей формулы:

$$\Delta l_s = \frac{l_s}{2 \cdot n_s}, \quad (1)$$

где Δl_s — длина участка s -ой зоны;

l_s — длина s -ой секции ЗВО;

n_s — целое число, определённое для каждой секции.

Рекомендации по выбору рациональных параметров охлаждения были разработаны для следующих этапов разливки:

– начало разливки (переход заготовки из кристаллизатора в первую секцию);

– перемещение заготовки до середины секции;

– достижение заготовкой середины секции;

– перемещение заготовки после середины секции;

– переход заготовки между секциями ЗВО.

После включения механизма вытягивания заготовки начинается слежение за её перемещением, т. е. рассчитывается (фиксируется) общая длина перемещения торца L . Также фиксируется общее время T после начала разливки и время прохождения заготовкой участков секции Δl_s (в данном случае кристаллизатора). С этого момента на каждом цикле опроса перемещения контролируется выполнение условия $L \geq l(кр)$.

Как только перемещение заготовки достигло величины длины кристаллизатора $L \geq l(кр)$, начинается формирование усреднённой средней скорости для первой секции ЗВО в соответствии со временем Δt_s прохождения заготовкой текущего участка секции Δl_s . Время Δt_s при переходе из кристаллизатора в первую секцию равно времени прохождения заготовкой расстояния $l(кр)$. С учётом дискретизации опроса датчика перемещения (скорости) рассчитывается время прохождения заготовкой кристаллизатора по формуле

$$t_s = t_{кр} = T - \frac{L - l(кр)}{v_{мгн}}, \quad (2)$$

где $v_{мгн}$ — значение мгновенной скорости разливки, зафиксированное за последний такт до события.

При расчёте усреднённой скорости для первой секции используется уравнение

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{t_s}, \quad (3)$$

где $l_s = l_{кр} = l_{н1}$ — расстояние от мениска металла в кристаллизаторе до торца заготовки, если он не дошёл до середины секции;

$t_s = t_{кр}$ — время перемещения торца заготовки от мениска до начала первой зоны (выхода из кристаллизатора) $l_{кр} = l_{н1}$, рассчитанное с учётом дискретизации.

Таким образом, по усреднённой скорости для первой секции (v_{cp}) задаётся расход воды на охлаждение в ней заготовки. Для всех остальных секций расход воды остаётся неизменным.

После того как заготовка достигла начала первой секции, т. е. выполнилось условие $L \geq l(кр)$, на каждом цикле опроса датчика перемещения оценивается положение начала заготовки относительно середины первой секции ЗВО $L \geq l_c(1)$. Если это условие не выполняется, то необходимо отслеживать последующее перемещение торца заготовки на расстояние, равное рассчитанному единичному участку первой секции Δl_1 . При этом необходимо также рассчитывать время перемещения заготовки по секции на расстояние Δl_1 .

Расчёт времени прохождения участка для каждой секции выполняется по формуле

$$\Delta t_s = n \cdot \Delta \tau, \quad (4)$$

где $\Delta t_s = \Delta t_1$ — время прохождения заготовкой участка первой секции Δl_1 ;

$\Delta \tau$ — дискретность опроса датчика скорости, с;

n — номер цикла опроса датчика скорости, начиная с которого выполняется условие

$$\sum_{j=1}^n \Delta \tau v_j \geq \Delta l(s), \quad (5)$$

где v_j — мгновенное значение скорости разливки при j -ом опросе;

$\Delta l(s) = \Delta l(1)$ — длина участка первой секции.

Учитывая дискретность опроса датчика скорости, необходимо скорректировать значение Δt_s . С учётом коррекции формула расчёта времени имеет вид

$$\Delta t_s = n \cdot \Delta \tau - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta \tau v_j - \Delta l(s)}{v_j}, \quad (6)$$

где $\Delta l(s) = \Delta l(1)$; $\Delta t_s = \Delta t_1$.

Для полученной величины Δt_s рассчитывается усреднённая скорость для первой секции

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{\Delta t(s)}, \quad (7)$$

где $l_s = l_{kp} + \Delta l_1 = L$;

$\Delta t(s) = \Delta t(1) = \Delta t(1) + \Delta t_1$.

После корректировки скорости и очередного перемещения заготовки на расстояние Δl_1 возвращаемся к проверке условия достижения торцом заготовки середины первой секции. Цикл повторяется до тех пор, пока не выполнится данное условие достижения заготовкой середины секции.

После того как головная часть заготовки достигла середины первой секции $L = l_c(1)$, средняя скорость рассчитывается по формуле (7). Учитывая, что $l_s = L = l_c(1)$, получим

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{\Delta t(s)} = \frac{l_c(1)}{\Delta t(1)}. \quad (8)$$

После пересечения началом заготовки середины первой секции $L > l_c(1)$ при каждом перемещении заготовки на расстояние участка секции выполняется перерасчёт средней скорости. Так как расчёт расхода воды в секции ЗВО выполняется для середины зоны, то дальнейшее перемеще-

ние начала заготовки по секции не влияет на значение l_s . После достижения заготовкой середины секции это значение необходимо рассчитывать по формуле

$$l_s = l_c(s). \quad (9)$$

В свою очередь, значение времени $\Delta t(s)$ прохождения заготовкой от мениска до середины секции будет изменяться при изменении скорости разливки. Для корректировки времени прохождения заготовкой данного участка определяется промежуток времени, за который она пройдёт расстояние Δl_s , двигаясь со скоростью $v_{cp}(s)$:

$$\Delta t^* = \frac{\Delta l_s}{v_{cp}(s)}. \quad (10)$$

После этого определяется разница между фактическим временем прохождения заготовкой расстояния Δl_s и рассчитанным по формуле (10):

$$\Delta t^{**} = \Delta t_s - \Delta t^*. \quad (11)$$

После возможной фильтрации значения, рассчитанного по формуле (11), определяется средняя скорость с учётом изменения времени

$$\Delta t(s) = \Delta t(s) + \Delta t^{**}. \quad (12)$$

После корректировки средней скорости разливки цикл алгоритма повторяется.

При достижении передним торцом заготовки начала следующей секции расчёт средней скорости для новой секции аналогичен расчёту, описанному для перехода из кристаллизатора в первую зону. Разница состоит только в выборе шага перемещения слитка Δl_s . При вхождении в новую зону этот шаг должен выбираться в соответствии с методикой, описанной выше. Корректировка средней скорости для предыдущих зон также осуществляется с шагом перемещения соответствующей секции, в которой в текущий момент находится начало заготовки.

Разработанная система динамического управления охлаждением заготовки в ЗВО при переходных режимах разливки адаптирована и отработана на промышленных МНЛЗ. Выполненные замеры колебаний температуры поверхности заготовки в ЗВО (с помощью пирометра) показали, что при использовании системы динамического управления охлаждением заготовки её колебания на переходных участках при изменении скорости вытяжки не превышают 2–3 °С. Использование в аналогичных условиях пропорционально скоростной схемы корректировки охлаждения приводит к значительно большим колебаниям температуры поверхности отдельных участков (12–15 °С).

Таким образом, разработанная система динамического управления охлаждением заготовки в ЗВО обеспечивает существен-

ное снижение температурного градиента по поверхности заготовки даже при наличии переходных режимов (ступенчатое изменение скорости разливки), что является достаточно актуальным для условий металлургических микрозаводов.

При варьировании скорости вытягивания заготовки для согласования технологических циклов выплавки и непрерывной разливки сериями предложенная система позволяет плавно изменять интенсивность охлаждения в соответствии с реальными скоростными параметрами, что способствует повышению качества металла. Особенно это важно при снижении скорости разливки, когда для предотвращения образования пористости и мостов требуется существенно снижать интенсивность подачи охладителя во всех секциях ЗВО.

Библиографический список

1. Стеблов, А. Б. Проектирование и строительство металлургического микрозавода [Текст] / А. Б. Стеблов, С. Н. Березов, М. М. Таурбеков, И. В. Дуброва // *Литьё и металлургия*. — 2013. — № 1. — С. 17–19.
2. Yasunaka, H. Improvement of surface quality of continuously cast steel by high cycle mold oscillation [Text] / H. Yasunaka // *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME*. — Warrendale : ISS-AIME, 1986. — Vol. 69. — P. 497–502.
3. Непрерывная разливка стали [Текст] : учебник / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.
4. Смирнов, А. Н. Некоторые аспекты организации производства в условиях современного микрозавода [Текст] / А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, Е. В. Штепан, Е. В. Новикова // *Металл и литьё Украины*. — 2009. — № 1–2. — С. 16–20.
5. Батраева, А. Е. Динамическое управление температурным состоянием заготовок МНЛЗ [Текст] / А. Е. Батраева, Б. Н. Парсункин, Е. Н. Ишиметьев и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2007. — № 11. — С. 20–25.
6. Салихов, З. Г. Математическое описание механизма использования охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ [Текст] / З. Г. Салихов, Е. Н. Ишиметьев, Р. Т. Газимов, К. З. Салихов // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2010. — № 3. — С. 59–62.
7. Масальский, С. С. Оптимизация вторичного охлаждения непрерывнолитых слитков [Текст] / С. С. Масальский, В. Н. Селиванов // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2000. — № 1. — С. 57–60.
8. Минтус, А. Н. Целесообразность динамического управления зоной вторичного охлаждения [Текст] / А. Н. Минтус, А. Ю. Цупрун, Д. А. Денисенко, В. Ю. Мариничев // *Наукові праці Донецького НТУ. Серія : Електротехніка і енергетика*. — 2007. — Вип. № 7 (128). — С. 91–94.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ПАО «АМК») Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 11.10.18.

к.т.н. Куберський С. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОПТИМІЗАЦІЯ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПІД ЧАС БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ В УМОВАХ МІКРОЗАВОДІВ

Показано відмінності технологічної схеми виробництва сталі в умовах металургійних мікрозаводів у порівнянні з інтегрованими підприємствами. Запропоновано підходи до організації узгодженої роботи основних технологічних агрегатів. Розроблено систему динамічного управління охолодженням безперервнолитої заготовки. Запропонований алгоритм і технологія управління витратою води забезпечують істотне зниження температурного градієнту по поверхні заготовки навіть в умовах частих і ступеневих змін швидкості розливання.

Ключові слова: мікрозавод, безперервне розливання, заготовка, швидкість розливання, вторинне охолодження, оптимізація, вода, витрата, динамічне управління, температура поверхні.

PhD Kuberskiy S. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

OPTIMIZATION OF SECONDARY COOLING WITH CONTINUOUS STEEL CASTING IN THE CONDITIONS OF MICROFACTORIES

The differences in technological scheme of steel production in the conditions of metallurgical microfactories are shown comparing to the integrated enterprises. The approaches to the organization of the coordinated work of the main technological units are proposed. A dynamic control system for cooling the continuously cast billet has been developed. The proposed algorithm and water flow control technology provides a significant reduction in the temperature gradient over the billet surface, even in the face of frequent and stepwise changes in the casting rate.

Key words: microfactory, continuous casting, billet, casting rate, secondary cooling, optimization, water, flow, dynamic control, surface temperature.