

УДК 621.746

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ УНРС № 1 ЦЕХА РАЗЛИВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

С. Г. Журавлев¹, А. В. Ширяйхин¹, А. В. Краснов¹, Г. Ю. Стрелецкий²,
В. Ю. Авдонин², С. В. Хомлев², В. В. Тимофеев², В. Н. Попович³

¹ ПАО «Северсталь» (г. Череповец, Россия),

² ЗАО «КонсОМ СКС» (г. Магнитогорск, Россия),

³ ООО «АСМ Группа» (г. Череповец, Россия)

Представлено описание проведенной реконструкции двухручьевого слябовой УНРС. Показаны основные решения и дано описание основного технологического оборудования и систем автоматизации технологического процесса. Проведен анализ результатов реконструкции УНРС.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, установка непрерывной разливки стали, вторичное охлаждение, динамическая система вторичного охлаждения, математическая модель вторичного охлаждения заготовки, роликовые секции, форсуночные устройства.

ЗАО «КонсОМ СКС» совместно с ООО «АСМ Группа» выполнили проект комплексного технического перевооружения УНРС № 1 цеха разливки конвертерной стали (ЦРКС) ПАО «Северсталь». В составе проекта:

замена роликовых секций радиального участка с двухопорными роликами на новые секции, оснащенные средними опорами;

внедрение новой системы вторичного охлаждения с отдельным регулированием охладителя на стационарные центральные и периферийные контуры (система «центр-периферия»);

модернизация водоразборного узла УНРС;

корректировка системы АСУ и внедрение новой математической модели для динамического регулирования расходов хладагентов в зоне вторичного охлаждения (ЗВО).

Полный инжиниринг проекта, концепция расположения форсуночных устройств в ЗВО, концепция управления расходами хладагентов, математическая модель управления вторичным охлаждением, адаптация верхнего уровня АСУТП, интерфейс и инструмент для реализации динамического управления, а также гарантийные показатели качества поверхности и макроструктуры непрерывнолитых заготовок обеспечивались специалистами ЗАО «КонсОМ СКС».

Изготовление и поставка всего объема механического оборудования, выполнение гарантий по рабо-

тоспособности и стойкости оборудования осуществлялись специалистами ООО «АСМ Группа». Участие в монтаже и наладке оборудования УНРС принимали специалисты ПАО «Северсталь». Ввод УНРС № 1 в эксплуатацию после завершения работ по техперевооружению состоялся в ноябре 2020 г.

Общий вид технологического канала УНРС № 1 с указанием подлежащего замене оборудования представлен на рис. 1.

Производственная программа ЦРКС ПАО «Северсталь» отличается большой гибкостью, широким марочным и размерным сортаментом при высокой степени загрузки оборудования. Разливка на УНРС № 1 ведется малыми сериями, со сменой ширины во время разливки (используется кристаллизатор с перемещающимися узкими стенками во время разливки), практически без остановок на переподготовки и ремонты, при сохранении высоких требований к качеству непрерывнолитых заготовок. В таких условиях особо остро встает вопрос о стойкости оборудования и технологических решениях в системе вторичного охлаждения.

Роликовые секции. Применительно к УНРС № 1 наибольшие простои по ремонту были вызваны заменой нижних кассет секций радиального участка (секции № 3 – 6), поскольку их демонтаж связан с необходимостью предварительного демонтажа вышележащих секций. Основная причина замены секции – выход

Таблица 1. Техническая характеристика УНРС № 1

Тип УНРС	Слябовая криволинейная с радиальным кристаллизатором
Количество ручьев, шт	2
Базовый радиус, мм	10000
Длина технологического канала, мм	37696
Длина зоны вторичного охлаждения, мм	19340
Длина медных стенок кристаллизатора, мм	900
Сечение разливаемых заготовок, мм	250×(1020 – 1850)
Скорости разливки предельные м/мин	0,2 – 1,5
Скорости разливки рабочие, м/мин	0,6 – 1,4

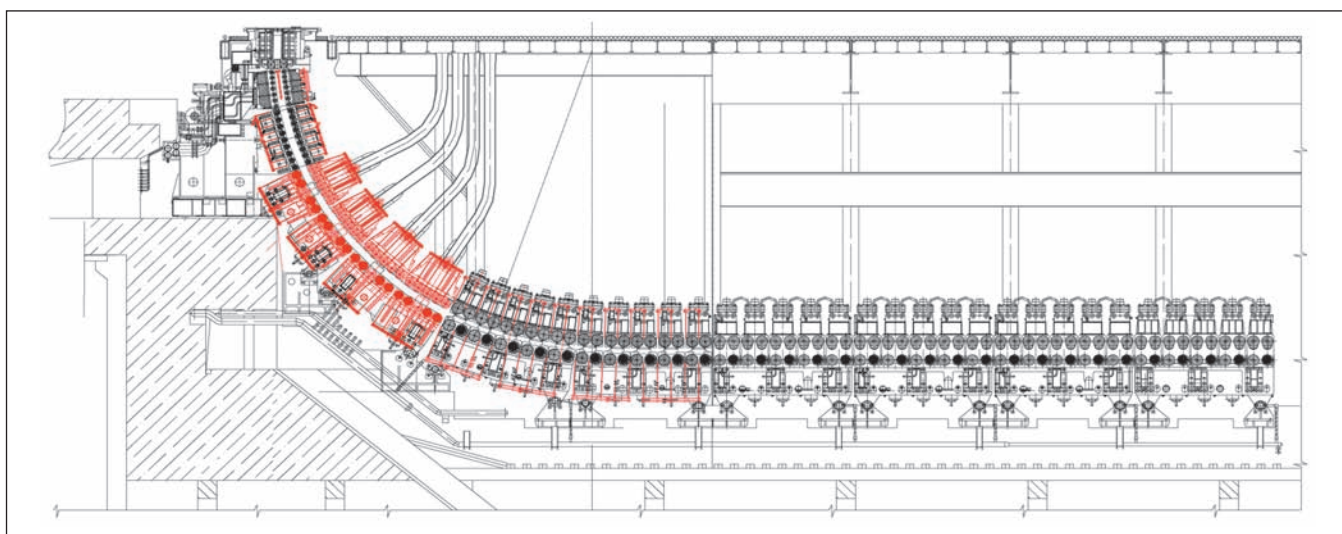


Рис. 1. Общий вид технологического канала УНРС № 1. Красным цветом выделен объем оборудования, замененный в ходе техпереворужения

роликов из строя по причине образования термоусталостных трещин. Их появление связывают с периодической сменой температур в поверхностном слое ролика при его входе в контакт с нагретой поверхностью заготовки и последующим выходом из контакта с ней [1]. При этом происходит деформация поверхностного слоя ролика в тангенциальном и осевом направлениях (прогиб ролика), что приводит к появлению в бочке ролика переменных напряжений и развитию трещин.

Для увеличения стойкости роликов и, как следствие, роликовых секций необходимо либо уменьшить прогибы роликов, либо увеличить пластичность и твердость поверхностного слоя. До технического перевооружения в конструкции секций радиального участка УНРС № 1 использовались двухопорные ролики с внутренним охлаждением. Рамы секций – с внутренним водяным охлаждением. Общий вид секций показан на рис. 2, А.

Для уменьшения прогиба роликов секций радиального участка двухопорный ролик был заменен на ролик со средней опорой (трехопорный). Требуемые механические свойства поверхностного слоя ролика достигнуты наплавкой бочки ролика проволокой ASM 4155-0A (ноу-хау «АСМ Группа»). Для поддержки средних роликовых опор и восприятия нагрузок от непрерывнолитого слитка конструкция рам верхних и нижних кассет была изменена. Выполнены рамы коробчатого сечения с усилением поперечными листами большой высоты (рис. 2, Б). Внутреннее охлаждение рам не используется. Посадочные места и способ крепления кассет удалось сохранить без изменений. Изменена группировка роликов в группы охлаждения таким образом, чтобы не требовалась реконструкция водоразборного узла и трубных разводов по УНРС. Средние опоры выполнены водоохлаждаемыми.

Примененные решения позволили значительно повысить стойкость роликовых секций и, таким образом, отказаться от одного ремонта в год по замене радиального участка роликовой проводки.

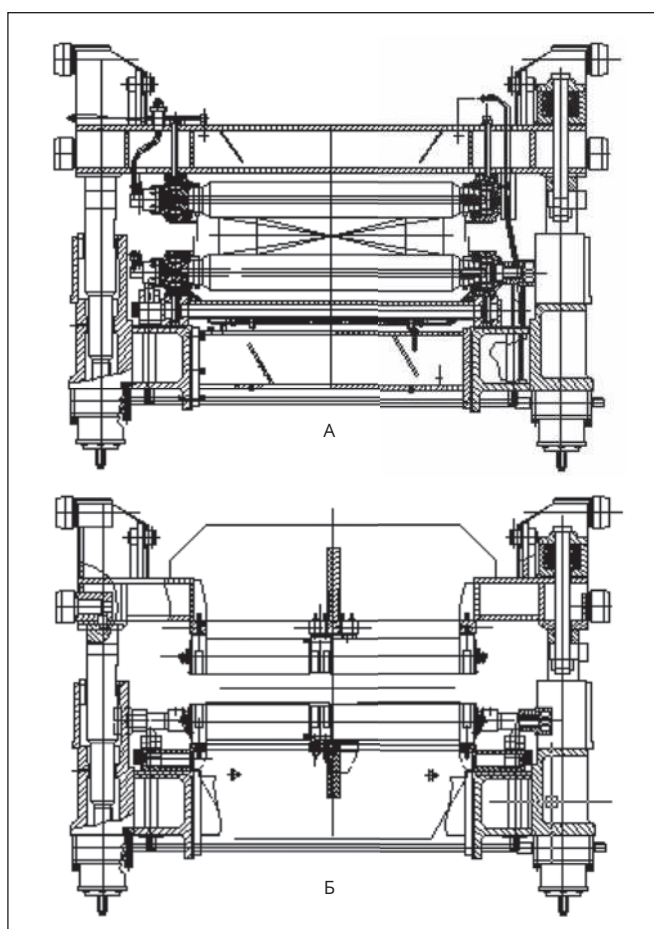


Рис. 2. Общий вид секций №3 – 6 УНРС № 1: А – секции до техпереворужения (двухопорный ролик, водоохлаждаемые рамы кассет); Б – секции после техпереворужения (трехопорный ролик, рамы кассет без охлаждения)

Зона вторичного охлаждения. До технического перевооружения ЗВО УНРС № 1 состояла из девяти зон с раздельным регулированием расходов в каждой зоне по большому и малому радиусам. В зонах № 1 (подбое), № 2 (секции № 1) и торцевой зоне был приме-

нен водяной способ охлаждения, во всех остальных зонах – водовоздушный.

В водяных зонах охлаждения № 1 и № 2 покрытие форсуночными факелами было настроено на максимально возможную ширину непрерывнолитых слитков (1850 мм), в зоне охлаждения № 2 применена двурядная схема расположения форсуночных устройств с шириной покрытия 1650 мм, в остальных зонах – однорядная схема расположения форсуночных устройств с шириной покрытия 1290 мм.

Коллекторы размещались стационарно, и их положение не изменялось при переходе с одной ширины на другую. Такая схема вторичного охлаждения позволяла упростить эксплуатацию и обеспечить охлаждение непрерывнолитых заготовок по так называемому горячему профилю [2 – 4]. Однако на сечениях шириной менее 1300 мм углы слитка охлаждались до температуры менее 900 °С (низкотемпературный интервал хрупкости) в зоне разгиба. Происходило падение пластических свойств стали в процессе деформации слитка и, как следствие, появление ребровых и приребровых трещин. В большей степени это проявлялось на перитектических и легированных бором, ванадием и других марках стали. На сечениях же шириной более 1450 мм при кристаллизации происходило формирование двух тепловых центров (рис. 3), что могло приводить к повышению балла по дефектам осевой зоны (осевая рыхлость и осевая хим. неоднородность), на повышенных (более 1 м/мин) скоростях разливки.

К недостаткам вторичного охлаждения, используемого на УНРС № 1 до техперевооружения, также можно отнести применение устаревших коллекторов вторичного охлаждения. Смешение водовоздушной смеси проводится в общих коллекторах (один смешительный коллектор на несколько форсуночных устройств). Данная конструкция не позволяет обеспечить равномерный распыл факела форсунок во всем диапазоне регулирования вода/воздух. На малых расходах воды происходит пульсация факела или полное перекрытие подачи охладителя.

Для устранения вышеуказанных недостатков была спроектирована и внедрена новая комбинированная схема вторичного охлаждения:

в зонах № 1 и 2 сохранено водяное охлаждение с шириной покрытия факелами 1850 мм (максимально возможная ширина слитка);

в зонах № 3 – 7 применено регулируемое по ширине водовоздушное охлаждение с двумя подключаемыми периферийными контурами (система «центр-периферия»);

в зоне № 8 применено регулируемое по ширине водовоздушное охлаждение с одним подключаемым периферийным контуром;

возле № 9 применено нерегулируемое по ширине водовоздушное охлаждение с шириной покрытия факела 1020 мм.

Пример организации системы регулируемого охлаждения по ширине слитка типа «центр-периферия» в зонах №3 – 7 показан на рис. 4.

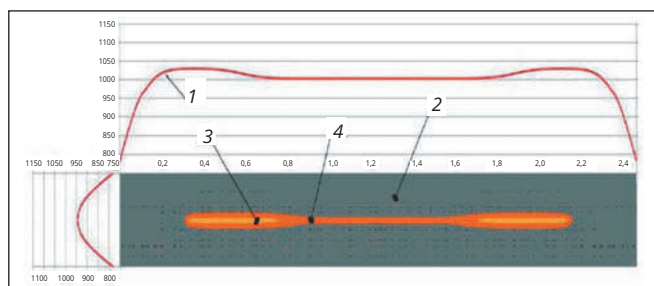


Рис. 3. Схема образования двух тепловых центров: 1 – температура на поверхности слитка; 2 – закристаллизованная часть слитка; 3 – жидкая фаза; 4 – двухфазная зона

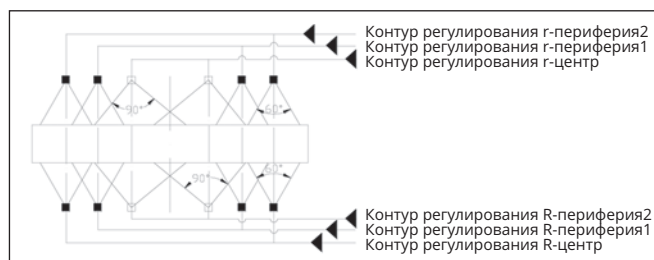


Рис. 4. Схема организации регулируемого охлаждения по ширине слитка типа «центр-периферия»

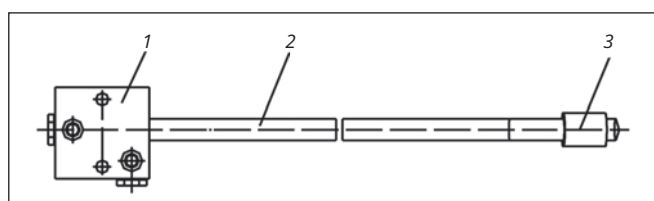


Рис. 5. Блок-форсунка: 1 – смешительная камера; 2 – удлинительная трубка; 3 – форсунка

Регулирование расходов охладителя проводится отдельно по большому и малому радиусам. Центральный контур организован водовоздушными форсунками с углом раскрытия 90°, периферийные контуры организованы малорасходными форсунками с углом раскрытия 60°.

Подключение/отключение контуров регулирования, определение расходов охладителя по длине УНРС и ширине слитка проводятся автоматически новой системой управления (система ДСВО), в зависимости от наличия жидкой фазы под факелами форсуночных устройств. Для исключения зарастания карбонатными отложениями форсуночных устройств контуров, не задействованных в охлаждении слитка, предусмотрен «холостой ход» контура с подачей минимальных расходов охладителя.

В качестве форсуночных устройств в водовоздушных зонах охлаждения применены блок-форсунки с верхним расположением смешительной камеры (рис. 5). Использование блок-форсунки позволяет обеспечить регулирование расходов охладителя в широком диапазоне с сохранением качества распыла, даже при ненормативных колебаниях параметров энергоносителей. Верхнее расположение камеры смешения и правильно рассчитанное сечение удлинительной трубки

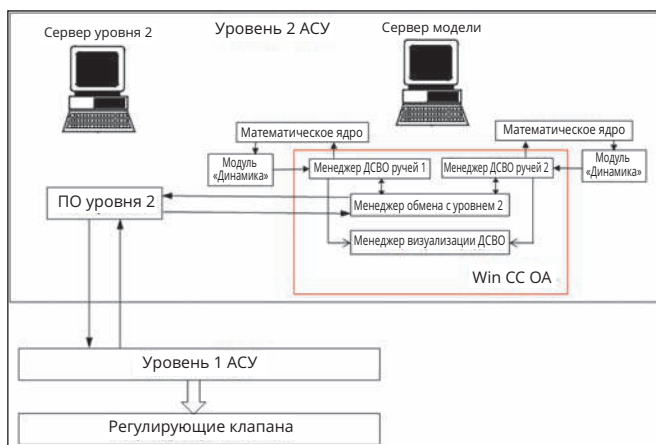


Рис. 6. Схема реализации программного комплекса ДСВО

обеспечивают длительную эксплуатацию форсуночного устройства с сохранением требуемых характеристик факела. Конструкция блок-форсунки допускает при необходимости оперативную замену устройства без демонтажа всего водовоздушного коллектора.

Новая схема вторичного охлаждения обладает следующими преимуществами:

использование водяного охлаждения в зонах № 1 и 2 уменьшает окалинообразование после выхода непрерывнолитого слитка из кристаллизатора, а также снижает концентрацию плавиковой кислоты в водяных парах. Это позволяет уменьшить накопление окалины на оборудовании в верхней части роликовой проводки УНРС, увеличить стойкость кристаллизатора и секции № 1;

регулируемое охлаждение по ширине слитка обеспечивает постепенное увеличение отступа факелами от краев слитка с сохранением равномерности охлаждения слитка по ширине. Обеспечивается горячий профиль охлаждения для всего разливаемого размерного сортамента, температура угла слитка в процессе сохраняется на верхней границе низкотемпературного интервала хрупкости, уменьшая вероятность образования ребровых и приребровых трещин. Равномерное

охлаждение по ширине способствует стабилизации качества осевой зоны слитка;

конструктивные решения примененных форсуночных устройств обеспечивают работоспособность ЗВО на всем межремонтном периоде.

Водоразборный узел УНРС и система контроля охлаждения средних опор. Новая схема вторичного охлаждения, а также применение средних опор потребовали организации новых 23 контуров охлаждения (22 контура вторичного охлаждения и один контур охлаждения средних опор) на ручей. Размещение оборудования водоразборного узла проводилось в стесненных условиях помещений на отметках с уже действующим оборудованием. Проект размещения был выполнен после тщательного обследования УНРС. Монтаж оборудования был выполнен практически без замечаний.

Для контроля охлаждения средних опор секций №3 – 6 была разработана новая система, которая отличается использованием стандартного оборудования (как датчиков контроля протока и температуры, так и шкафов ЕТ для передачи информации в АСУ УНРС). Для интеграции нового оборудования в АСУ УНРС были спроектированы и поставлены новые шкафы управления. Визуализация технологического процесса также была скорректирована с учетом добавляемого оборудования.

Система управления вторичным охлаждением: математическая модель и пользовательский интерфейс. Для управления расходами охладителя в ЗВО была разработана новая система управления вторичным охлаждением – динамическая система вторичного охлаждения (ДСВО). ДСВО предназначена для выбора и поддержания требуемого температурного профиля охлаждения непрерывнолитого слитка при изменении скорости разливки с учетом изменяющихся параметров разливки (химический состав металла, температура металла в промковше, фактические расходы охладителя по контурам регулирования и др.). ДСВО состоит из модели кристаллизации непрерывнолитого слитка (математическое ядро), которая дополнена

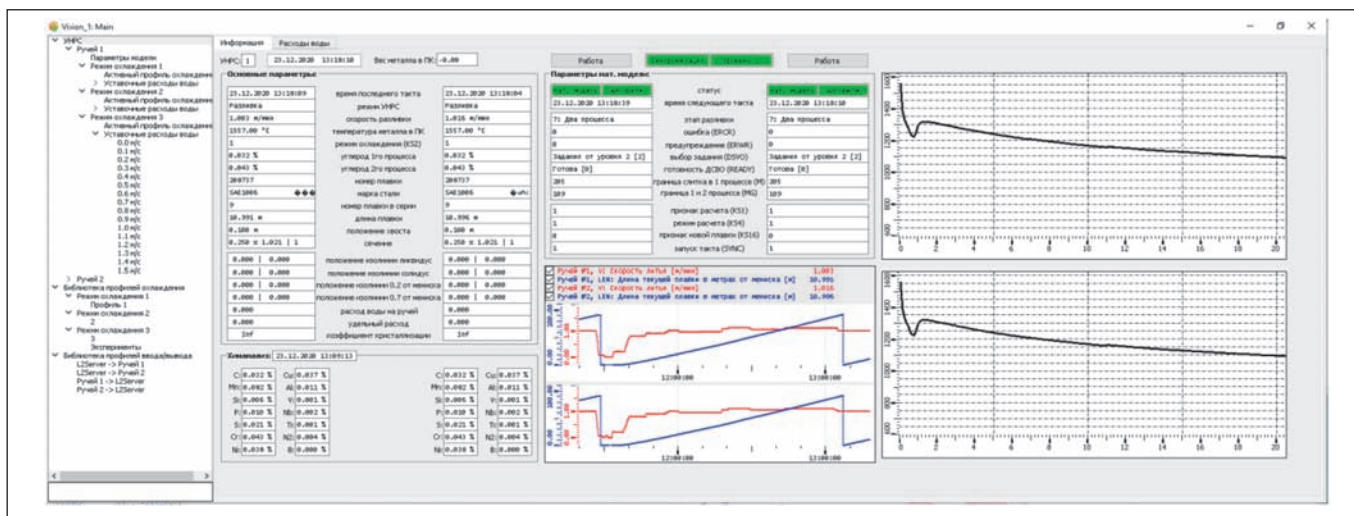


Рис. 7. Основной экран визуализации системы ДСВО

необходимыми модулями управления – «Динамика», «Обжатие» (в данном проекте модуль не использовался), «Конфигурация» (в данном проекте модуль не использовался) и интеграционной оболочкой, которая обеспечивает взаимодействие ядра с программным обеспечением Уровня 2 АСУ УНРС и пользователем.

ДСВО реализована на отдельном физическом сервере (сервер модели). Такая реализация позволила интегрировать ДСВО в АСУ УНРС без глобальных изменений ПО Уровня 2. Схема реализации ДСВО показана на рис. 6.

Модель кристаллизации основана на квазиравновесном подходе к кристаллизации слитка с учетом гидродинамических процессов в зоне затвердевания [1,5]. Она представляет собой численное решение системы из четырех дифференциальных уравнений: теплопроводности, диффузии, сплошности расплава и сохранения импульса, уравнения состояния расплава (условия квазиравновесия), связывающего температуру и концентрацию легирующих элементов по сечению. Математическая модель дополнена уравнениями проницаемости двухфазной зоны и прочности расплава.

Теплообмен на наружной поверхности – конвекция при форсуночном охлаждении, излучение, контактный теплообмен с роликами гибко задается граничными условиями.

Модуль «Динамика» служит для определения расходов охладителя в зонах охлаждения и представляет собой систему уравнений ПИД-регуляторов с количеством уравнений, равных числу зон. Сравнивая расчетные значения температуры поверхности слитка в середине зон охлаждения с выбранной кривой охлаждения, ПИД-регуляторы генерируют новые значения расхода.

Модуль «Обжатие» служит для определения границ динамического мягкого обжатия и представляет собой привязку роликов технологического канала и гидроцилиндров сегментов обжатия к результатам расчета ядра по количеству жидкой фазы на оси слитка.

Модуль «Конфигурация» представляет собой набор данных, определяющих технологические параметры УНРС и ЗВО – длина кристаллизатора, количество и длина зон охлаждения, тип зоны охлаждения (водяная/водовоздушная), наличие регулирования охлаждения по ширине в зоне охлаждения, количество и расположение форсунок в зоне охлаждения и др.

Интеграционная оболочка реализована в среде Win CC OA. Win CC OA – клиент-серверная распределенная SCADA система с открытой архитектурой. Система Win CC OA состоит из модулей (независимых процессов) – менеджеров. Основными модулями интеграционной оболочки являются: менеджер ДСВО (для каждого ручья используется отдельное математическое ядро и соответственно отдельный модуль ДСВО), менеджер обмена с программным обеспечением Уровня 2, менеджер визуализации.

Менеджер ДСВО служит для запуска математического ядра, загрузки в ядро исходных данных для расчета (ширина слитка, скорость разливки, температура

металла в промковше, расходы на регулирующих клапанах, хим. состав металла и др. – итого более 7000 параметров).

Менеджер обмена с Уровнем 2 служит для синхронизации работы ПО Уровня 2 и системы ДСВО.

Менеджер визуализации предназначен для отображения результатов расчета ядра, текущего состояния и архивных значений работы системы, ввода и изменения уставок. Информация предоставляется пользователю в удобной, интуитивно понятной форме на дисплее автоматизированного рабочего места пользователя, независимо от визуализации Уровня 2.

Работа системы ДСВО представляет собой такты математического расчета. Каждый такт состоит из следующих этапов: формирование набора актуальных данных менеджером обмена, загрузка данных в ядро менеджером ДСВО, собственно расчет (температуры поверхности, содержания жидкой фазы, расходов охладителя), выгрузка результатов расчета на Уровень 2 и далее на базовый уровень, а также на модуль визуализации.

Таким образом, работа ДСВО динамическая, поскольку в реальном времени, с минимальной задержкой отображает тепловое состояние слитка и реагирует на любые изменения параметров разливки. Динамическая работа системы позволяет минимизировать отклонения от выбранного технологического профиля охлаждения и свести к минимуму вероятность образования дефектов поверхности и макроструктуры непрерывнолитых слитков.

Технологическая часть системы ДСВО также имеет глубокое наполнение. Температурные профили охлаждения разделены на три группы (мягкий, средний, жесткий). Для каждого профиля сформированы как таблицы расходов охладителя, так и сами графики температур. Выбор профиля охлаждения проводится автоматически, в зависимости от поступающего химического состава. Оператор УНРС в выборе режима охлаждения не задействован. Присутствует возможность оперативной корректировки критериев выбора режима охлаждения в зависимости от химического состава.

Имеется несколько вариантов управления процессом охлаждения:

управление по расходам, когда используются табличные расходы охладителя, а при изменении параметров разливки обеспечивается плавный переход с одного значения расхода на другое;

управление по заданному температурному профилю, когда в зависимости от скорости разливки температурный профиль поддерживается постоянным;

управление по заданному температурному профилю с учетом скорости разливки. В данном случае температурная кривая охлаждения немного корректируется – параллельно смещается относительно оси температур.

Переключение между вариантами управления возможно в реальном времени. Для каждого способа управления имеется возможность создания бесконечного набора подрежимов.

Таким образом, ДСВО представляет собой мощный технологический инструмент управления технологическими параметрами непрерывной разливки. Монтаж всего объема оборудования, шкафов управления, программного обеспечения, процесс пусконаладки были совмещены с плановым ремонтом УНРС. Время ремонта составило 20 сут. УНРС была запущена с опережением графика ремонта.

По итогам испытаний все гарантии по стойкости, качеству непрерывнолитых заготовок, качеству проката были выполнены.

ВЫВОДЫ

1. Проведено техническое перевооружение УНРС № 1 КС СП ЦРКС ПАО «Северсталь».

2. Заменены на новые секции № 3–6 радиального участка технологического канала. В конструкции секций применены трехопорные водоохлаждаемые ролики с наплавкой, вместо двухопорных.

3. Благодаря увеличению межремонтной стойкости оборудования ручья удалось уменьшить время простоя УНРС, связанное с текущими плановыми ремонтами.

4. Разработана и внедрена новая схема ЗВО с регулированием охлаждения по ширине (система «центр-периферия»).

5. Проведена модернизация водоразборного узла УНРС с размещением оборудования на действующих отметках без переноса существующего оборудования.

6. Разработана и внедрена новая система контроля слива охлаждающей воды от средних опор.

7. Разработана и внедрена новая система управления расходами охладителя в ЗВО – ДСВО, включая модель кристаллизации непрерывнолитого слитка, модули управления расходами, модуль мягкого обжатия, а также интеграционную оболочку модели в ПО Уровня 2.

8. Комплекс примененных при техническом перевооружении мероприятий позволил успешно выдержать гарантийные испытания на работоспособность, стойкость, качество непрерывнолитых заготовок и качество проката.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Низковских В. М., Карлинский С. Е., Беренов А. Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. – М. : Metallurgia, 1990. – 271 с.
2. Буланов Л. В., Корзунин Л. Г., Парфенов Е. П. и др. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 320 с.
3. Харсте К., Банненберг Н., Бергман Б., Шпицер К. Оптимизация процесса непрерывного литья заготовок и наблюдение за его ходом // Черные металлы. 1993. С. 16 – 25.
4. Буланов Л. В., Юровский Н. А., Бусыгин В. В. и др. Сравнение существующих концепций вторичного охлаждения непрерывнолитых заготовок на традиционных слябовых МНЛЗ // Черная металлургия : Бюл. НТИ. 2012. № 3. С. 40 – 49.
5. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М. : Metallurgia, 1987. – 224 с.

Статья поступила 21.06.2021