МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Л.В. КАМКІНА, А.А. НАДТОЧІЙ, Р.В. АНКУДІНОВ, О.В. БАБЕНКО

КУРС ЛЕКЦИЙ

Дніпропетровськ НМетАУ 2013

ЛЕКЦИЯ №1
Современная непрерывная разливка стали в мире и Украине

Под непрерывной разливкой стали принято подразумевать систему технологий и операций, которые обеспечивают квазинепрерывный перевод жидкой стали, находящейся в сталеразливочном ковше, в твердое состояние в виде заготовок определенной геометрической формы. Процесс непрерывной разливки металла обеспечивает последовательную (без остановок) разливку определенного количества ковшей, подаваемых от сталеплавильных агрегатов, а получаемая заготовка при этом разрезается на мерные длины в соответствии с требованиями потребителей и затем отправляется на перекат в соответствующие прокатные цехи. При этом выход годной заготовки составляет 98,5-99,5% от массы разлитой жидкой стали. Разливку стали непрерывным способом осуществляют на специальных машинах, называемых машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), которые имеют определенную архитектуру.

Идея разливки металла в непрерывном режиме принадлежит Г.Бессемеру: им была запатентована в 1856 г. схема разливки металла между двумя вращающимися роликами. В дальнейшем большинство исследователей стремилось создать МНЛЗ с медным водоохлаждаемым кристаллизатором коробчатого типа, расположенным вертикально. Наибольший технологический рывок был обеспечен при этом З.Юнхансом, сформулировавшем концепцию возвратно-поступательного движения кристаллизатора с целью предотвращения прилипания твердой корочки заготовки (патент 1936 г.). Первые промышленные МНЛЗ были запущены в эксплуатацию в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия. Одна из первых промышленных слябовых МНЛЗ была запущена в 1960 г. в мартеновском цехе Донецкого металлургического завода. Сегодня МНЛЗ успешно работают более чем в 90 государствах мира и их общее количество превышает 2100 штук. Это позволило обеспечить в 2007 г. разливку примерно 1215 млн.т стали на МНЛЗ, что составляет не менее 91% от всего объема выплавленной жидкой стали в мире.

Прогресс в применении технологии непрерывной разливки стали является наиболее ярким явлением в системе технологий черной металлургии в мире. Так, еще в 1970 г. только 4,5% стали разливалось на МНЛЗ, а в 1987 г. этот показатель превысил 50%.

Рис.1.1. Динамика наращивания объемов стали, разливаемой на МНЛЗ (млн.т) в период с 1970 по 2997 г.г.

К началу третьего тысячелетия практически все более или менее современные сталеплавильные цеха были полностью оснащены МНЛЗ, что позволило достичь показателя доли непрерывной разливки в мире на уровне 91%. При этом в большинстве стран мира доля стали, разливаемой на МНЛЗ, превышает 93-95%. Исключение составляют такие государства, как Россия, Украина, Бразилия и некоторые другие, доля непрерывной разливки в которых значительно ниже в силу продолжающейся реконструкции сталеплавильного комплекса.

В настоящее время ведущими производителями МНЛЗ в мире, определяющими направление развития оборудования и технологии непрерывной разливки, являются фирмы Siemens-VAI (Австрия, Германия), SMS-Demag (Германия), Danieli (Италия), Sumitomo (Япония) и пр. В Украине единственным производителем МНЛЗ является ОАО «Новокраматорский машиностроительный завод». В России производство МНЛЗ осуществляется на ЗАО Машиностроительная корпорация «Уралмаш».

Основными видами непрерывнолитой заготовки, которые отличаются, прежде всего, геометрической формой, являются: сляб (*Slab*), блюм (*Bloom*), сортовая заготовка (*Billet*), круг (*Round*) и специальные фасонные профили, например, типа «собачья кость» *(Dog Sholder)*. Промышленно производятся непрерывнолитые заготовки следующих максимальных сечений: сляб 250х3200 мм, блюм 600х670 мм, и круг диаметром 600 мм.

сляб

круг

блюм или сортовая заготовка **фасонный профиль**

Рис.1.2. Основные виды сечений непрерывнолитой заготовки

Однако основные направления развития техники и технологии непрерывной разливки стали продолжают фокусироваться на совершенствовании процессов литья заготовок традиционных сечений (сляб, блюм) и на создании новых МНЛЗ для получения сортовых заготовок квадратного и круглого сечения, тонких слябов, листа и фасонных профилей, которые в максимальной степени приближены к готовой продукции (с учетом необходимого обжатия при прокатке).

Преимущества такого подхода легко увидеть на рис.1.3, позволяющим сравнить систему технологий производства квадратной заготовки с использованием сортовых МНЛЗ и консервативную систему производства квадратной заготовки с разливкой в слитки и прокаткой на блюминге и крупносортном стане.

Рис.1.3. Сравнение технологических схем производства сортовой заготовки с непрерывной разливкой (а) и с разливкой на слитки и последующей прокаткой (б)

Наблюдающееся в последнее время заметное увеличение удельной производительности сталеплавильных агрегатов (особенно дуговых сталеплавильных печей) способствует развитию тенденции ускоренной модернизации существующих МНЛЗ с целью повышения их производительности при одновременном повышения качества заготовки. Примечательно то, что 50-55% всех МНЛЗ были

либо сооружены, либо реконструированы именно в последние 10-15 лет, что свидетельствует о непрерывном научно-техническом прогрессе в технологии и оборудовании для непрерывной разливки. Это, прежде всего, относится к слябовым и сортовым МНЛЗ.

В настоящее время на 9 металлургических предприятиях Украины функционируют 18 МНЛЗ различного типа с общим количеством ручьев – 62. В 2007 г. в Украине на МНЛЗ было разлито 14,7 млн. т стали (34,3% от общего годового объема выплавленной стали). Ожидается, что в ближайшие 2-3 года на МНЛЗ в Украине будут разливать 18-19 млн. т стали. В целом в Украине имеются все основные типы классических МНЛЗ, позволяющих разливать сляб, блюм, круг и сортовую заготовку. Между тем большая часть стали (не менее двух третей) разливается тем не менее на слябовых МНЛЗ.При этом львиная доля МНЛЗ эксплуатируется на металлургических заводах Донбасса.

Основные данные машин для непрерывной разливки стали Украины

Завод	Начало эксплуатации/ реконструкция*	Количество МНЛЗ х количество ручьев	Тип МНЛЗ (конструкция)	Сечение заготовки, мм	Годовая производительность в 2007 г. / проектный номинал млн. т	Производитель МНЛЗ
ОАО «Донецкий металлургический завод «ДонецкСталь», г.Донецк	1960 2003*	1х4	вертикальная	(150-200) – (600–1200)	0,58/0,6	ЮУМЗ
ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь», г.Мариуполь	1977 2005*	3х2	радиальная	200 х 1200 – 315 х 1900	4,4/4,5	Уралмаш НКМЗ*
	2008	1х2	криволинейная с загибом	(220-270) х (1500-2100)	-/2,5	Danieli
ДП «Завод утяжеленных и ведущих бурильных труб», г. Сумы	1987	1х2	вертикальная	□200-□500	0,07/0,10	Danieli
ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», г.Мариуполь	1993	2х1	Радиальная	250 х (1500-1900)	2,4/1,5	Уралмаш
	2006	1х1	Криволинейная с загибом	(150-250) х (1100-1900)	0,75/1,1	Siemens-VAI
ОАО “Днепровский металлургический комбинат», г.Днепродзержинск	1994	2х6	Радиальная	335х400	1,3/1,5	ЮУМЗ
	2008	1х7	Радиальная	130х130 150х150 200х200	-/1,4	Siemens-VAI
ЗАО «Мини-металлургический завод «ISTIL (Ук-	1999	1х6	Радиальная	□100-150 Ф120-180	0,87/0,8	Danieli

раина), г.Донецк						
ОАО «Енакиевский металлургический завод, г.Енакиево	2001 2002	2х6	Радиальная	□120-□150	2,3/2,0	НКМЗ
ОАО «Алчевский металлургический комбинат», г.Алчевск	2005 2006	2х2	Криволинейная с загибом	(200-300) х (1000-2000)	2,2/2,5	VAI
ООО «Электросталь», г.Курахово	2008	1х4	Радиальная	□100-□135	-/0,3	STB

История развития непрерывной разливки стали (таблица).

ЛЕКЦИЯ №2
Общие принципы системы технологий непрерывной разливки, архитектура МНЛЗ и ее основные функциональные узлы

Основной технологической функцией любой МНЛЗ является перевод стали из жидкого состояния в твердое с приданием получаемой заготовке определенной геометрической формы и обеспечением качественных показателей ее поверхности и внутренней структуры, регламентируемых соответствующими техническими условиями.

Для достижения твердого состояния заготовки необходимо отвести некоторое количество тепла в окружающую среду в течение определенного времени по определенному закону. Для нормального процесса охлаждения необходимо обеспечить движение заготовки с определенной скоростью при регламентированном отводе тепла (охлаждение водой).

Общая схема разливки стали с обозначением основных функциональных узлов и механизмов представлена на рис.2.1.

Рис.2.1. Общая схема разливки стали на МНЛЗ

Процессу непрерывной разливки стали на МНЛЗ обязательно предшествует целый комплекс подготовительных и вспомагательных операций, основными из которых являются: футеровка промежуточного ковша, его сушка и подогрев до температуры 900-1100°С; установка промковша в рабочее положение над кристаллизаторами; установка затравок и холодильников во внутренней полости кристаллизаторов; транспортировка сталеразливочного ковша от установки внепечной обработки к МНЛЗ и установка его на поворотный стенд и пр. Еще раньше проверяется функционирование всех узлов и механизмов, а также КИП и автоматики.

Рис.2.2. Схема укладки холодильников в кристаллизаторы квадратного сечения

Разливка стали начинается с открытия шиберного затвора сталеразливочного ковша. Подача металла из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется, как правило, закрытой струей через огнеупорную защитную трубу. После заполнения промковша металлом на 30-40% его номинальной емкости начинается подача стали в кристаллизаторы. Регулирование расхода стали, вытекающей из промковша в кристаллизатор, осуществляется либо посредством литья через калиброваные стаканы-дозаторы при поддержании заданной высоты налива металла в промковше, либо посредством изменения положения стопора относительно стакана-дозатора в промковше.

Рис.2.3. Перелив струи стали из промковша в кристаллизатор открытой струей

После заполнения внутренней полости кристаллизатора металлом начинается процесс движения затравки вниз. При этом скорость вытяжки заготовки определяется толщиной твердой корочки заготовки на выходе из кристаллизатора, которая необходима для предотвращения прорывов металла по ходу разливки.

В процессе разливки кристаллизатор совершает возвратно-поступательные движения с определенной частотой и амплитудой, что предотвращает прилипание твердой корочки заготовки к поверхности кристаллизатора. Уровень металла в кристаллизаторе подерживается на постоянном уровне, что обеспечивает повышение качества поверхности заготовки и стабилизирует процесс литья.

Разливка металла может одновременно осуществляться на 1-2 ручьях для слябовых МНЛЗ и на 1-8 ручьях для блюмовых и слябовых МНЛЗ. Выбор количества ручьев осуществляется из соображений обеспечения требуемой производительности МНЛЗ применительно к конкретному сталеплавильному цеху.

Производительность МНЛЗ (т/мин) может быть определена по формуле:

$$П = b \bullet s \bullet v_c \bullet \rho \bullet n$$

где b и s – толщина и ширина заготовки, м; v_c – скорость вытяжки заготовки, м/мин.; ρ – плотность стали $=$ 7,6 т/м^3; n – количество ручьев, шт.

После выхода из кристаллизатора заготовка проходит через зону вторичного охлаждения (ЗВО), протяженность которой может составлять 8-35 м в зави-

симости от условий разливки (сечение заготовки, марка стали, скорость разливки и пр.). В этой зоне охлаждение заготовки осуществляется водовоздушной смесью, распыляемой специальными форсунками, которые установлены по ходу движения заготовки. Заготовка движется по поддерживающим роликам, установленным вдоль технологической оси.

Рис.2.4. Зона вторичного охлаждения сортовой МНЛЗ (слева) и слябовой (справа)

При этом протяженность участка, на котором заготовка полностью затвердевает приближенно определяется по формуле (м):

$$L_s = (0{,}25 \cdot b^2 \cdot v_c) / K^2$$

где K – константа затвердевания, K = 0,024-0,026 м/мин^{0,5} для сляба; K = 0,028-0,029 м/мин^{0,5} для сортовой заготовки и блюма.

После выхода из ЗВО заготовка проходит тянуще-правильную клеть, затем производится отделение затравки и заготовка подается на машину газовой резки, где она режется на мерные длины и затем маркируется.

Рис.2.5. Отделение затравки от сляба после тянуще-правильной клети

Отрезанная мерная заготовка (как правило, 6-12 м) транспортируется к устройству поперечной транспортировки заготовок, где передается на холодильник.

Рис.2.5. Сталкиватель и холодильник сортовой МНЛЗ

Разливка стали осуществляется сериями из нескольких сталеразливочных ковшей (10-25 ковшей и более). Серийность разливки обеспечивает значительный энерго- и ресурсосберегающий эффект. При этом замена пустого сталеразливочного ковша на полный осуществляется путем изменения позиции поворотного стенда. Эта операция называется перековшовка. Время замены сталеразливочного ковша составляет, как правило, 90-120 секунд. В это время разливка продолжается в обычном режиме (или с уменьшением скорости движения заготовки) за счет металла, находящегося в промковше.

Регулирование скорости разливки (вытяжки заготовки) осуществляется двумя способами: путем регламентирования расхода металла, вытекающего из промковша и путем изменения скорости вытяжки заготовки.

Завершение процесса разливки осуществляется прекращением выпуска металла из сталеразливочного, а затем из промежуточного ковша. При этом в промковше остается определенный остаток жидкого металла (высота слоя 200-300 мм), который препятствует попаданию шлака из промковша в кристаллизатор. После прекращения подачи металла из промковша движение заготовки приостанавливается, что позволяет «застудить» верхнюю часть заготовки с целью предотвращения выливания металла через край (рис.2.6). С этой целью с зеркала металла в кристаллизатора удаляется шлак и на него подается вода. Далее заготовка продолжает свое движение и полностью выводится из МНЛЗ.

Рис.2.6. Окончание процесса разливки на блюмовой МНЛЗ (удаление шлака)

<u>Основными параметрами разливки являются:</u>

V_p – скорость разливки (0,3-0,5 м/мин для блюмовых МНЛЗ; 0,6-2,0 м/мин для слябовых МНЛЗ; 4-6 м/мин для сортовых МНЛЗ);

L_p – рабочая длина МНЛЗ (от 7-10 м для вертикальных МНЛЗ; 15-35 м для радиальных и криволинейных МНЛЗ);

$R_в$ – общий расход воды на охлаждение (1-2 л/т для сортовой заготовки; 0,3-1,0 л/т для блюма и сляба);

П – производительность МНЛЗ (0,2-0,25 млн. т в год на 1 ручей сортовой и блюмовой МНЛЗ; 1,2-1,5 млн. т в год на 1 ручей слябовой МНЛЗ).

<u>Основные функциональные узлы МНЛЗ</u>:

- стенд для замены сталеразливочных ковшей, предназначенный для быстрой замены пустого сталеразливочного ковша на полный;
- промковш, обеспечивающий стабильное истечение металла с регламентированной скоростью в кристаллизатор, накопление металла до момента перековшовки, всплытие неметаллических включений, усреднение состава металла по температуре и химическому составу;

- кристаллизатор, предназначенный для приема жидкого металла и формирования твердой корочки заготовки; он выполняется из меди и охлаждается в процессе разливки водой; длина кристаллизатора обычно составляет 0,8 – 1 м;
- зона вторичного охлаждения (ЗВО) составляет 6 – 30 м, служащая для охлаждения заготовки (распыления воды форсунками) и поддержания геометрической формы заготовки (предотвращение выпучивания);
- тянущеправильная клеть, регулирующая движение заготовки, а так же ее разгиб на радиальных и криволинейных машинах;
- машина газовой резки, обеспечивающая порезку заготовок на мерные длины.

<u>Основные потери металла при непрерывной разливке стали:</u>

-обрезь головной частью слитка (0,4 - 0,5 м);

-обрезь с хвостом заготовки из-за усадки (2 – 3 м);

-остаток металла в промковше после разливки («козел» 5 – 10 тонн);

-вырезка по погружному стакану в случае его замены (0,4 – 0,6 м);

-потери с окалиной и порезке – до 0,2% от массы разливаемой стали.

ЛЕКЦИЯ №3

Основные типы МНЛЗ

Конструкционное оформление МНЛЗ непрерывно развивается в течение всего периода их применения в промышленности. Основные конструктивные и технологические решения обычно направлены повышение производительности МНЛЗ, ее компактности, обеспечение высокого качества заготовки, снижение трудоемкости процесса, уменьшение энергозатрат и повышение обеспеченности автоматическими системами управления. Основными вопросами при этом являются рациональная конфигурация, расположение и протяженность главной технологической оси, профиль поперечного сечения заготовки, совмещение дискретного характера подачи стали от плавильного агрегата с непрерывной работой МНЛЗ и т.п.

Первоначально (50-е и 60-е годы прошлого столетия) МНЛЗ имели ***вертикальную*** архитектуру, включая участок порезки заготовки на мерные длины. Преимущества таких МНЛЗ заключаются в том, что все процессы формирования заготовки происходят в вертикальной плоскости (так же как и у слитка). Это обеспечивает получение высокого качества внутренней структуры заготовки и упрощает конструкцию машины в целом.

Рис.3.1. Основные типы вертикальных МНЛЗ

Между тем вертикальные МНЛЗ имеют достаточно серьезные ограничения по скорости разливки (а, следовательно, производительности), поскольку ее повышение предполагает увеличение технологической длины машины и существенное удорожание оборудования. Однако развитие кислородно-конвертерного процесса, бурно происходившее именно в 60-е и 70-е годы прошлого века, обусловило существенное увеличение удельной производительности конвертеров как за счет уменьшения цикла плавки, так и за счет повышения ее массы. Поэтому развитие конструкции МНЛЗ в этот период характеризуется стремлением повысить их производительность за счет увеличения скорости разливки и количества ручьев. Поэтому более поздние конструкции вертикальных МНЛЗ предусматривали загиб заготовки после ее затвердевания и порезку заготовки при ее расположении в горизонтальной плоскости. Загиб заготовки при этом осуществлялся как по одноточечной, так и по многоточечной схемам. Существенным преимуществом таких машин является улучшение условий выдачи заготовки на холодильник.

В настоящее время вертикальные МНЛЗ используются довольно редко и в основном для получения высококачественного блюма и сляба.

В 70-е и 80-е годы прошлого столетия наибольшее распространение при разливке стали получили ***МНЛЗ радиального типа***.

Рис.3.2. Схема МНЛЗ радиального типа (R_o – базовый радиус МНЛЗ)

Конструктивной особенностью таких машин является наличие кристаллизатора определенного радиуса (соответствует базовому радиусу МНЛЗ R_o), что обеспечивает получение радиальной технологической линии. После затвердевания заготовки осуществляется ее разгиб в горизонтальной плоскости. Следовательно, выдача готовой заготовки на холодильник осуществляется в горизонтальной плоскости.

Преимущества радиальных МНЛЗ перед вертикальными следующие: меньшая высота машины, высокая скорость разливки, что увеличивает производительность, горизонтальная выдача заготовки на холодильник и пр. Недостатки таких МНЛЗ относятся, главным образом к качеству заготовки, которое, как правило, несколько ниже, чем у вертикальнолитой, что объясняется всплытием неметаллических включений в кристаллизатор к стенке большего радиуса и возможным появлением внутренних трещин, возникающих при разгибе заготовки. Последнее устраняется путем применения системы многоточечного разгиба. В настоящее время радиальные МНЛЗ используются преимущественно для получения сортовой и блюмовой заготовки.

Развитием концепции высокопроизводительных МНЛЗ следует считать так называемые ***криволинейные МНЛЗ***, отличительной особенностью которых является наличие вертикально расположенного кристаллизатора и вертикального участка под ним длиной 1,5-2,5 м (рис.3.3).

Рис.3.3. Сравнение условий формирования заготовки в вертикальном (слева) и радиальном кристаллизаторе

Далее заготовка загибается до определенного (базового) радиуса. Это позволяет обеспечить благоприятные условия для формирования заготовки в начальный период затвердевания, в том числе для всплытия неметаллических включений.

Загиб затвердевающей заготовки осуществляется в 5-8 и более точках, что предотвращает возможность образования трещин и прорывов металла в твердой корочке. Последующие участки криволинейной МНЛЗ в целом аналогичны дизайну радиальных МНЛЗ. Основные преимущества крисволинейных МНЛЗ находятся в плоскости повышения качества заготовки (в первую очередь, поверхностных и подповерхностных слоев) и увеличения компактности машины. Между тем определенным недостатком таких МНЛЗ является повышение требований к точности настройки роликов ЗВО и технологической линии в целом. Наиболее важными функциональными моментами при этом являются зона загиба и разгиба заготовки, где жестко регламентируется величина деформации твердой корочки. Наибольшее применение криволинейные машины получили при разливке слябовой заготовки.

Рис.3.4. Схема МНЛЗ криволинейного типа (L_1 – участок разгиба заготовки; L_2 – участок загиба заготовки; R_o – базовый радиус МНЛЗ)

В последнее десятилетие все большее распространение получают ***<u>криволинейные МНЛЗ для отливки тонких слябов</u>*** (около 40-60 мм и менее). Отличи-

тельной особенностью таких МНЛЗ является принципиально новая конфигурация внутренней полости кристаллизатора, имеющая т.н. «чечевицеобразную форму». Среди преимуществ тонкослябовых МНЛЗ можно назвать возможность получения слябов шириной свыше 3000 мм и уменьшение потерь энергии и металла в ходе последующего прокатного передела, который совмещается с разливкой в едином агрегате, называемом литейно-прокатный модуль (ЛПМ).

На рубеже тысячелетий в сталелитейной практике появились первые промышленные ***МНЛЗ для прямого получения листа***, в которых удается исключить из технологической схемы цикл горячей прокатки заготовки. В агрегатах прямой отливки тонкого листа кристаллизатор состоит из двух валков, расположенных непосредственно под промковшом и вращающихся в противоположных направлениях.

Рис.3.5. Схема МНЛЗ для прямой отливки листа

Жидкая сталь при разливке поступает в пространство между валками и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью и выходят из валков в форме листа, толщина которого определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора. Для отвода выделяющегося тепла валки, изготовленные, как правило, из сплава меди с хромом, охлаждаются водой. В качестве покрытия валков используют различные материалы на основе никеля, хрома или керамики. Технологическая схема получения тонкого листа с применением двухвалковых

МНЛЗ имеет огромный потенциал в части экономии энергетических ресурсов (в 8-10 раз), снижения потерь с окалиной (в 40-50 раз), повышения производительности работы персонала (5-10 раз), снижения выбросов парникового газа (в 10-20 раз) при существенном снижении затрат на капитальное строительство, что обеспечивает экономическую мотивацию в части его дальнейшего развития и совершенствования.

В металлургической практике известны также МНЛЗ, технологическая линия которых расположена горизонтально. ***Горизонтальные МНЛЗ*** представляются весьма перспективными в части снижения затрат на строительство машины. Они компактны и их удобно размещать в действующих цехах. При этом нет необходимости увеличивать высоту здания или формировать глубокий колодец. Обслуживание такой машины, ремонт и замена основных узлов весьма удобны и просты. Между тем отсутствие деформации заготовки в процессе затвердевания даёт возможность лить горизонтальным способом хрупкие и трещиночувствительные стали и сплавы, которые не выдерживают деформации в процессе литья.

Рис.3.6. Схема горизонтальной МНЛЗ

Однако достаточно очевидным представляется и тот факт, что качество заготовки при этом будет значительно ниже, вследствие того, что неметаллические включения и пузырьки газа будут всплывать к верхней грани. Такая физическая неоднородность существенно снижает кондиции продукции из заготовки. Кроме того, до настоящего времени на практике не решены полностью вопросы успешного совмещения работы металлоприемника и кристаллизатора (для условий разливки стали). Поэтому в черной металлургии такие МНЛЗ практически не используются.

Широкое распространение горизонтальные МНЛЗ получили при разливке цветных металлов и сплавов.

Рис.3.7.Фото горизонтальной МНЛЗ для разливки сортовой заготовки

ЛЕКЦИЯ №4

Техника и технология доводки и передачи стали на МНЛЗ

Жидкая сталь, полученная в сталеплавильном агрегате выпускается в сталеразливочный ковш. Вместимость ковшей обычно равна массе одной плавки и может составлять от нескольких десятков тонн до 330-350 т жидкой стали. При этом длительность пребывания стали в ковше может составлять от 2 до 6 часов, что обусловливает высокие требования к надежности и стойкости рабочего слоя футеровки ковшей.

Функционально сталеразливочный ковш обеспечивает транспортировку стали от сталеразливочного ковша к МНЛЗ, доводку стали по химическому составу и температуре и перелив в промковш.

Передача стали от сталеплавильного агрегата к МНЛЗ осуществляется в сталеразливочных ковшах, которые перемещаются с помощью сталевозов и подъемных кранов.

Рис.4.1. Установка ковша с жидкой сталью на сталевоз

В рабочем слое футеровки сталеразливочного ковша (рис.4.2) применяются, как правило, штучные периклазоуглеродистые огнеупоры с содержанием MgO свыше 95-98% или наливные футеровки из высокоглиноземистых тиксотропных

масс. На металлургических заводах Западной Европы все более широкое распространение получают доломитовые огнеупорные изделия, которые используются в стенах и днище ковша. Стойкость таких ковшей поддерживается на уровне 90-100 плавок. При этом удельный расход огнеупоров на тонну стали составляет 2,5-2,6 кг/т для ковшей без вакуумирования и 4,0-4,5 кг/т для ковшей, работающих по схеме ковш-печь и вакууматор VD/VOD.

Рис.4.2.Схема футеровки сталеразливочного ковша штучными изделиями (слева) и наливными бетонами для днища и стен (справа): 1-фиксирующий слой; 2 – теплоизолирующий слой; 3 – шлаковый пояс; 4 – стена; 5 - выравнивающая защита; 6 – выравнивающий слой; 7 – блоки, установленные в месте падения струи; 8 – начальный слой бетона; 9 – ремонтный слой бетона.

Дозирование стали при переливе из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется посредством шиберного затвора. Шиберный затвор, обеспечивает равномерную подачу стали в промковш в течение всего периода разливки. Кроме того шиберный затвор обеспечивает перекрытие струи стали посредством смещения нижней огнеупорной плиты в случае возникновения аварийных ситуаций или замены защитной трубы.

Рис.4.3. Схема расположения огнеупоров узла шиберного затвора

Современные технологические построения обычно предполагают выпуск из конвертера или ДСП в ковш железоуглеродистого полупродукта (нераскисленный металл с содержанием углерода и марганца 0,05-0,08% и 0,10-0,15% соответственно). При этом, как правило, исключается попадание печного шлака в ковш. Все дальнейшие шаги по доводке стали по химическому составу и температуре выполняются исключительно в ковше. Такая схема, как показывает практика, делает процесс выплавки и разливки стали более экономичным, а также обеспечивает наиболее полное совмещение процесса выплавки и непрерывной разливки стали.

В ходе обработки стали в ковше могут выполняться следующие операции: гомогенизация металла по температуре и химическому составу, корректировка химического состава стали путем присадки соответствующих лигатур, удаление вредных примесей (сера, водород, азот, а иногда углерод и пр.), доведение температуры метала до регламентируемого технологией значения, рафинирование стали по неметаллическим включениям, получение стали с постоянными свойствами от плавки к плавке, управление составом шлака и т.д.

В металлургической практике наибольшее распространение получили агрегаты «ковш-печь» (от английского *ladle-furnace*), обеспечивающие

комплексную доводку стали в течение 40-60 минут. Современный агрегат ковш-печь (рис.4.4) имеет вполне устоявшуюся технологическую архитектуру и конструкцию основных функциональных элементов, в состав которых входят: система для нагрева металла электрическими дугами, система подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше, средства для перемешивания металла инертным газом, устройство для подачи порошковой проволоки, крышка, устанавливаемая на ковш перед обработкой и т.п. На практике для вдувания инертного газа в металл используются либо специальные блоки, устанавливаемые в днище ковша, либо погружаемые в расплав фурмы.

Рис.4.4. Общая схема агрегата «ковш-печь» (слева) и общий вид двухпозиционной установки

В современной практике производства широкого спектра марок стали вакуумная обработка (дегазация) является неотъемлемым интегрированным звеном технологического процесса. Основная идея технологии вакуумной обработки стали исходит из термодинамической возможности смещения равновесия химических реакций в сторону выделения газообразных продуктов в результате снижения атмосферного давления. Прежде всего, это относится к растворенному в стали водороду, азоту, а также кислороду. При этом в

результате химической реакции с углеродом кислород выделяется из расплава в виде CO и CO_2, обеспечивая наряду с раскислением обезуглероживание стали.

Современные промышленные способы вакуумирования расплава разделяются на две группы:

- обработка в едином цикле всей массы металла в сталеразливочном ковше, который помещают в специальную вакуумную камеру (камерный вакууматор *VD*);
- непрерывное вакуумирование потока расплава в специальной вакуумкамере с двумя погруженными в сталеразливочный ковш патрубками, в один из которых вводят инертный газ для организации контура циркуляции (циркуляционный вакууматор *RH*).

Вакууматоры *VD* и *RH* могут быть оснащены средствами для организации глубокого обезуглероживания расплава под вакуумом. В этом случае процессы именуются как *VD/VOD* и *RH-TOP* соответственно.

Рис.4.5. Схема вакууматора *VD/VOD* (слева) и *RH-TOP (справа)*

После внепечной обработки ковш с металлом с помощью подъемного крана подается на поворотный стенд МНЛЗ. При этом серийная разливка на МНЛЗ требует быстрой замены пустого сталеразливочного ковша на полный. Замена ковшей на современных МНЛЗ осуществляется посредством поворотных стендов или самоходных тележек. Как правило, время замены сталеразливочного

ковша ограничивается 90-120 секундами, что требует наличия на МНЛЗ специального комплекса оборудования.

Рис.4.6. Поворотный стенд МНЛЗ комбината «Азовсталь» (вместимость ковша 330 т жидкой стали)

Поворотные стенды состоят из опорной колонны, поворотных частей с приводом поворота и подъема сталеразливочных ковшей и устройством для их взвешивания. Преимуществом поворотных стендов является их компактность. Кроме того, раздельный подъем независимых лаг позволяет осуществлять раздельные, независимые технологические операции подъема-опускания лаг, как на позиции разливки , так и на резервной позиции. Это позволяет существенно снизить динамические нагрузки на весоизмерительные датчики, шарнирные соединения и другие узлы машины при установке стальковша на стенд.

Самоходная тележка для замены сталеразливочного ковша перемещается непосредственно по разливочной площадке, меняя позиции ковшей. Однако при этом необходимо иметь весьма большое свободное рабочее пространство на разливочной площадке или в рабочей зоне разливочных кранов при условии усиления металлоконструкции на всем пути следования тележек. В принципе такая схема использовалась на ряде МНЛЗ, построенных в 70-е и 80-е годы прошлого

века (например, ККЦ-2 Новолипецкого металлургического завода). Однако в дальнейшем от нее отказались все основные производители МНЛЗ.

Рис.4.7. Установка VD/VOD на 110 т

Рис.4.8. Установка циркуляционного вакуумирования RH

ЛЕКЦИЯ №5
Промежуточный ковш: функциональное назначение и конструкция

Промежуточный ковш является одним из важнейших технологических элементов при разливке стали на МНЛЗ, поскольку находится между сталеразливочным ковшом и кристаллизатором МНЛЗ. Промковш обеспечивает тем самым прием металла из сталеразливочного ковша, его усреднение и перелив в кристаллизаторы.

Промковш перемещается к МНЛЗ и устанавливается над кристаллизаторами с помощью специальной транспортной тележки. При разливке стали длинными и сверхдлинными сериями в случае износа футеровки (или переходе на разливку другой марки стали) осуществляется замена промковша на новый, же подается другой транспортной тележкой. Функционирование промковша в процессе разливки в значительной степени определяет устойчивость и стабильность процесса литья на МНЛЗ в целом.

Рис.5.1. Схема перелива металла из сталеразливочного ковша в промковш и кристаллизаторы МНЛЗ

Жидкий металл, который поступает в промковш из сталеразливочного ковша через открытый шиберный затвор. При этом температура стали оказывает

существенное влияние на процесс литья, а потери тепла на этом участке движения должны иметь минимальные значения. Кроме того сталь должна минимально перемешиваться со шлаком в промковше и не контактировать кислородом воздуха.

Потери тепла сталью связаны, по меньшей мере, с тремя основными технологическими факторами:

- потерями тепла металлом в процессе его нахождения в сталеразливочном ковше за счет излучения через стенки, днище и зеркало металла (эти потери составляют 0,45-0,6^{O}С в минуту и зависят от состояния футеровки сталеразливочного ковша);
- потерями тепла металлом в ходе перелива из сталеразливочного ковша в промежуточный (эти потери составляют, как правило, 15-30 ^{O}С; потери тепла уменьшаются при наличии огнеупорной защитной трубы, устанавливаемой между сталеразливочным и промежуточным ковшами);
- потерями тепла через футеровку и зеркало металла в промежуточном ковше.

Рис.5.2. Динамика изменения температуры стали, вытекающей из сталеразливочных ковшей и промковша в ходе серийной разливки

Дополнительные потери тепла металлом наблюдаются при разливке первого ковша в серии, что объясняется необходимостью прогрева футеровки промковша при попадании в него жидкой стали. Как правило, промковш уже подается на

МНЛЗ разогретым. Температура футеровки при этом составляет 1000-1100 ^{O}С, а температура стали в первом в серии сталеразливочном ковше обычно предусматривается на 15-20°С выше, чем в последующих.

Таким образом, промковш МНЛЗ выполняет следующие основные функции:

- принимает сталь, выливающуюся из сталеразливочного ковша;
- накапливает металл в объемах, необходимых для стабильного процесса литья (высота налива h = 700…1000 мм) в течение всего период разливки;
- обеспечивает резерв металла для разливки в период замены сталеразливочного ковша (до 3–5 мин разливки без подачи металла из сталеразливочного ковша, уровень стали при этом падает до 400-350 мм) ;
- обеспечивает распределение и дозирование стали при переливе из промковша в кристаллизаторы МНЛЗ;
- усредняет сталь по температуре и по химическому составу в ходе разливки;
- обеспечивает минимальные потери тепла металла в промковше;
- обеспечивает рафинирование металла за счет всплытия неметаллических включений.

Поэтому конструкция промковша должна учитывать следующие основные факторы:

- количество и расположение ручьев МНЛЗ и сечение разливаемых заготовок;
- способ регулирования процесса истечения металла из промковша;
- способ начала процесса разливки и метод удаления шлака и остатков металла после ее окончания;
- оснащенность промковша специальными устройствами и приспособлениями (например, для непрерывного замера температуры или подогрева металла в ходе литья);
- характер рационального движения конвективных потоков металла, способствующих всплытию неметаллических включений в шлак или обеспечивающих повышенный износ элементов футеровки промковша;
- возможность дополнительной рафинирующей обработки металла в промковше посредством его продувки инертным газом

●количество последовательно разливаемых плавок в серии.

Геометрическая форма промковша выбирается по возможности наиболее простой и приближенной к параллелепипеду. Это упрощает процесс изготовления футеровки промковша и его эксплуатации (например, извлечения остатка металла после разливки). Для удобства экс плуатации также выполняются технологические уклоны стенок промковша верху вниз. Для более эффективного приема струи металла из сталеразливочного ковша в конструкции промковша может предусматриваться специальная полость в виде «кармана».

Рис.5.3. Вид сверху для промковша сортовой МНЛЗ, наполненного жидкой сталью

Оптимальная емкость промковша определяется сечением (шириной) отливаемых заготовок, числом ручьев, расстоянием между ручьями, скоростью разливки, требованиями к возможности всплытия неметаллических включений и ассимиляции их шлакообразующим покрытием. На величину емкости промковша влияет также и режим разливки: в случае серийной разливки емкость промковша увеличивается с целью обеспечения запаса металла, необходимого для замены сталеразливочного ковша.

Как показывает практика, для высокоскоростных сортовых 6-ти ручьевых МНЛЗ, например, емкость промковша составляет, как правило, 25-30 тонн при высоте налива металла не менее 0,7-0,8 м. Для многоручьевых (4-6 ручьев) блюмовых МНЛЗ емкость ковша колеблется в пределах 25-35 тонн металла при той же высоте налива стали. Для двухручьевых слябовых МНЛЗ в последнее десяти-

летие отмечена тенденция повышения объема промковша до 45-55 тонн и более. Важным критерием выбора рационального значения массы металла в промковше является также время пребывания жидкой стали в промковше, то есть так называемое «резидентное» время. Значение этого показателя обычно выбирается на уровне 8-10 минут. При его выборе руководствуются соображениями обеспечения всплытия неметаллических включение из металла в в покровный шлак.

Важную роль в стабильности работы промковша играет организация движения потоков стали в момент начала разливки и по ее ходу. Металл, попадающий в промковш из сталеразливочного ковша, движется в виде компактной струи вертикально вниз со скоростью несколько метров в секунду. Припадении такой струи может происходить вовлечение в перемешивание покровной теплоизолирующей смеси трубы, а также удар струи о днище промковша, что приводит к изменению направления движения потоков: вверх под наклоном или горизонтально. При этом днище ковша в месте удара имеет повышенный износ и разрушения. Обычно эта зоны футеровки промковша выполняется из более прочных огнеупоров. Для торможения струи в области ее контакта с днищем используются дополнительные приемные устройства, которые выполняются из специальных высокопрочных огнеупорных материалов и имеют геометрическую форму типа «стакан».

Рис.5.4. Огнеупорное изделие, обеспечивающее торможение падающей из сталеразливочного ковша струи

Основным функциональным недостатком металлоприемников такой конструкции является неравномерное разрушение стенок «стакана», что существенно меняет с направленность движения потоков стали.

Для организации рационального движения потоков в промковше дополнительно устанавливают пороги и перегородки определенной конструкции. Кроме того, для повышения чистоты стали в промковше устанавливаются специальные фильтрационные перегородки, представляющие собой вертикальные плиты с отверстиями. Положение перегородок и порогов выбирается индивидуально для каждой конструкции промковша и зависит от целого ряда соображений.

Рис.5.5. Схема движения потоков стали в промковше

При разливке сталей с повышенными требованиями к содержанию неметаллических велючений в днище промковша могут устанавливаться специальные пористые блоки, обеспечивающие вдувание в расплав инертного газа (аргона). Как правило, такая технология обеспечивает удаление до 30-40% оксидов непосредственно в промковше.

Для обеспечения стабильного температурного режима разливки на практике могут использовать дополнительный (корректирующий) подогрев металла в промковше, что позволяет поддерживать температуру на заданном уровне (25-

30°С выше температуры ликвидус). Наиболее часто для подогрева металла в промковше используют плазменную горелку. Прирост температуры жидкой стали в промковше при использовании плазменных горелок этого типа составляет примерно 10°С. При использовании плазменной горелки повышается точность регулирования температуры стали в промковше до ±5°С. Это улучшает качество металла, увеличивает выход годного, а также несколько снижает удельный расход воды на тонну разливаемой стали.

Рис.5.6. Общая схема плазменного подогрева стали в одноручьевом промковше

Рис.5.7. Фотография устройства для плазменного подогрева стали

Эксплуатационные затраты и стоимость технического обслуживания системы плазменного подогрева стали в промковше оцениваются в размерах 0,5-0,7 долларов США на тонну стали.

ЛЕКЦИЯ №6

Промежуточный ковш - 2: методы дозирования стали при ее истечении из промковша в кристаллизатор

Особое внимание в практике непрерывной разливки стали уделяется дозированию металла при вытекании из промковша. При истечении металла из промковша стремятся сформировать определенный удельный расход стали (в соответствии со скоростью вытяжки заготовки), максимально компактную поверхность струи стали, а также ее защиту от вторичного окисления. Следует иметь в виду, что в процессе истечения стали через дозирующее устройство происходит трансформация геометрической формы определенных зон дозирующих огнеупоров. Это может происходить либо в силу эрозионного износа и при сколах и растрескиваниях огнеупорных изделий, либо при отложении оксидов алюминия (или других шлаковых включений) на их рабочей поверхности.

Различают три основные схемы дозирования металла:

- свободное истечение металла из промковша при строгой регламентации диаметра отверстия стакана-дозатора (скорость разливки при этом регулируется за счет высоты налива металла в промковше);
- применение стопора-моноблока, который может перемещаться относительно стакана-дозатора и изменять тем самым расход вытекающего металла;
- путем применения трехплитного шиберного затвора, устанавливаемого на днище промковша.

Для обеспечения первой схемы разливки применяются специальные стаканы-дозаторы, оснащенные цирконовыми вставками, обладающими высокой огнеупорной и эрозионной стойкостью. Внутренняя вставка такого стакана-дозатора изготавливается из дорогостоящего диоксида циркония (содержание на уровне 95%), а внешний стакан – из цирконосиликата ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) с содержанием оксида циркония порядка 60-65% и оксида кремния – 30-35%. Они обеспечивают длительную разливку без существенного изменения внутреннего диаметра (до 15-20 часов).

При постоянном ферростатическом напоре и одинаковом удельном расходе стали струя, свободно истекающая из стакана-дозатора, имеет сплошной участок, длина которого достаточна для достижения ею зеркала металла в кристаллизаторе.

Рис.6.1. Разливка стали открытой струей, свободно вытекающей из промковша

Необходимый внутренний диаметр стакана-дозатора определяется удельным расходом стали (кг/мин). Обычно величина диаметра внутренней полости стакана-дозатора находится в пределах 12-18 мм.

Рис.6.2. Удельный расход металла при разливке открытой струей в зависимости от высоты налива металла в промковше

В зависимости от сечения заготовки, скорости вытяжки слитка, высоты налива металла в промковше, марки стали и т.п. внутренний диаметр стакана дозатора может быть определен по следующей формуле:

$$d_o = (0{,}06 \ldots 0{,}07) \cdot [(A \cdot B \cdot v) / h^{0,5}]^{0,5}$$

где d_o - диаметр стакана-дозатора, мм;

A и B – размеры сторон поперечного сечения заготовки, м;

v – скорость вытягивания заготовки, м/мин;

h – высота налива стали в промковше,м.

В случае медленного изменения (увеличения) диаметра стакана-дозатора, регулировка уровня стакана осуществляется увеличением скорости вытяжки заготовки. Другой причиной выхода стакана-дозатора из строя является зарастание его внутренней полости вследствие оседания на поверхности цирконовой вставки продуктов раскисления стали алюминием. Поэтому на практике по такой схеме разливают «недораскисленные» стали с содержанием остаточного Al_2O_3 на уровне 0,004-0,006%. Рассмотренная схема дозирования используется в основном для сортовых МНЛЗ и обеспечивает разливку 15-20 ковшей в серию.

Рис.6.3. Основные типы стаканов-дозаторов промковшей

В последние годы ведущие зарубежные фирмы большое внимание уделяют системам оборудования для быстрой замены стакана-дозатора непосредственно в ходе разливки в случае его разрушения или затягивания. [фильм из RHI]

Рис.6.4. Принципиальная схема устройства для замены стакана-дозатора

Такие устройства предполагают расположение под днищем промковша специальной кассеты, имеющей, по крайней мере, два стакана-дозатора, быстрая установка которых в рабочее положение (цикл перемещения стакана-дозатора составляет 0,2 секунды) осуществляется с помощью специального гидропривода. Применение устройства для быстрой замены стакана-дозатора обеспечивает повышение стабильности процесса литья и увеличивает количество ковшей стали, которые могут быть разлиты из одного промковша. Это соответственно снижает удельный расход огнеупоров, уменьшает удельную долю отходов металла по поясам, по концевой и головной обрези и с остатком металла в промковше. Кроме того, благодаря обеспечению хорошей организации струи повышается качество заготовки при разливке длинными сериями за счет минимизации вторичного окисления на участке промковш-кристаллизатор.

Между тем, на практике наиболее распространенной схемой разливки стали из промковша является применение схемы дозирования типа «стопор»-«стакан-дозатор». При этом расход металла по ходу разливки регулируется положением головки стопора относительно стакана-дозатора. Управление положением стопора осуществляется с помощью специального механизма, работающего либо в

ручном, либо в автоматическом режиме. [фильм SERT]

Рис.6.5. Схема разливки стали через систему «стопор»-«стакан-дозатор»: расположение привода механизма перемещения стопора на промковше (слева) и расположение стопора относительно стакана-дозатора (справа)

Преимуществом такой схемы дозирования металла является:

- возможность оперативного изменения расхода металла;
- возможность полного перекрытия истечения металла из данного стакана-дозатора в случае производственной необходимости;
- возможность существенного увеличения внутреннего диаметра стакана-дозатора (в сравнении со свободным истечением), что в несколько раз снижает скорость его зарастания отложениями корунда;
- применение корундографитовых материалов для изготовления стакана-дозатора взамен дорогостоящего оксида циркония;
- хорошая совместимость с системами автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе.

В настоящее время на ряде металлургических заводов мира вместо стопора-моноблока в промковше применяется трехплитный шиберный затвор. Дозирование стали при этом осуществляется за счет перемещения средней плиты.

Рис.6.6. Схема подачи стали из промковша через трехплитный шиберный затвор:

В целом, как показывает практика, трехплитный шиберный затвор может при определенных условиях обеспечить разливку сериями 8-10 плавок, что тем не менее заметно уступает показателям, которые достигаются при использовании стопоров-моноблоков. Однако применение шиберных затворов в определенной степени изменяет условия разливки, что может оказывать влияние как на сам процесс разливки, так и на качество непрерывнолитой заготовки. Особенно это относится к процессу старта МНЛЗ и регулированию расхода металла в ходе разливки.

Рис.6.7. Расположение шиберного затвора на промковше

По сравнению с разливкой со стопором разливка из промковша через трехплитный шиберный затвор имеет следующие достаточно серьезные функционально-технические недостатки:

- для старта процесса разливки должна предусматриваться дополнительная система операций и приспособлений, поскольку затвор в момент наполнения промковша остается открытым; как правило, над каждым стаканом-дозатором устанавливается керамическая труба высотой 30-50% от высоты номинального налива металла в промковше, что обусловливает момент начала разливки либо условием перелива металла через верхний край огнеупорной трубы, либо всплытием трубы в определенный момент времени;
- при разливке через трехплитный шиберный затвор удлиняется система каналов, по которым движется сталь, от промковша до погружного стакана, что повышает вероятность ее зарастания отложениями корунда; при этом возможность «промывки» каналов кислородом практически отсутствует;
- при смещении шиберной плиты возможно образование «мертвых» зон, в которых происходит намерзание капель металла и отложение неметаллических включений, что может существенно влиять на точность дозирования металла;

Рис.6.8. Схема зарастания канала шиберного затвора в процессе разливки

- поскольку регулирование расхода металла в шиберном затворе осуществляется за счет изменения положения средней плиты, то в ходе такого дросселирования происходит разрушение компактной геометрической формы струи, ее разбрызгивание и разрушение огнеупоров, входящих в контакт со струей;
- наличие определенного технологического зазора между плитами шиберного затвора является дополнительным источником подсоса воздуха (вторичного окисления) в движущуюся струю стали, что особенно негативно проявляется при разливке вакуумированных сталей и сталей с повышенным содержанием алюминия;
- при разливке стали через трехплитный шиберный затвор в силу инерционности привода «загрубляется» система автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе, что приводит к большим рабочим амплитудным значениям и, возможно, к снижению качества поверхности;
- шиберный затвор подвергается дополнительным температурным нагрузкам в силу того, что он располагается над зеркалом металла в кристаллизаторе, что требует дополнительных защитных мероприятий.

ЛЕКЦИЯ №7

Промежуточный ковш - 3: футеровка и ее износ

Футеровка промковша работает в чрезвычайно сложных условиях, поскольку ее рабочий слой непрерывно контактирует с жидкой сталью в течение 10-25 часов и более. После окончания разливки футеровка охлаждается вместе с остатком металла, который затем удаляется из промковша. Соответственно многократно используемая часть футеровки подвергается дополнительным нагрузкам, связанным с циклическим изменением температуры и механическими ударами (при удалении остатка).

Следовательно, как емкость, вмещающую жидкую сталь, промежуточный ковш необходимо футеровать определенными видами огнеупоров, учитывающими специфику их эксплуатации. Выбор конструкции и вида огнеупоров является весьма ответственной задачей, так как огнеупоры должны отвечать требованиям, обеспечивающим устойчивую, бесперебойную работу промковша в течение всего процесса разливки.

Рис.7.1. Основные элементы футеровки промковша

Огнеупоры в промковше выполняют следующие основные функции:

- контакт с металлом и защиту емкости промковша от разрушения;
- максимальное предотвращение потерь тепла жидкой сталью;
- обеспечение рационального движения потоков металла в промковше;

- дозирование металла при переливе его в кристаллизатор;
- защита стали от вторичного окисления при переливе из сталеразливочного ковша в промковш и из промковша в кристаллизатор.

Одним из важнейших элементов, обеспечивающих функционирование промковша, является футеровка его стен и днища, которая размещается в металлическом кожухе. Для облегчения удаления остатков металла после окончания разливки внутренние стенки ковша выполнены с уклоном 5-10ºС. Футеровка, как правило, выполняется трехслойной: *рабочи*й (непосредственно контактируюший с жидкой сталью), *арматурный* (используемый многократно) и *теплоизоляционный* (обеспечивающий минимизацию потерь тепла) слои. В среднем расход огнеупоров промковша составляет 2,5-3,5 кг/т разливаемой стали.

Рабочий слой обычно работает только один цикл разливки. Рабочий слой наносится на арматурный методом мокрого торкретирования (набрызгивания). Гранулометрический состав такой торкрет-массы колеблется в пределах 0,1-1,0 мм. Торкрет порошок смешивается с определенным количеством водой в специальной установке и затем набрызгивается на арматурный слой, имеющий температуру 60-80°С. Толщина слоя торкрет-покрытия, наносимого на стенки и днище промежуточного ковша зависит от длительности серии разливки и составляет от 30 мм до 80 мм.

Рис.7.2. Машина для торкретирования стен и днища промковша (слева) и нанесение торкрет покрытия (справа)

Минимальная толщина покрытия должна составлять 30 мм. Это обеспечивает оптимальный эффект сцепления торкрет-покрытия с рабочей футеровкой и ее беспрепятственное отделение от арматурного слоя после разливки.

Таблица 7.1. Физико-технические показатели торкрет-массы рабочего слоя.

Материал	Содержание, %			Температура эксплуатации, °С	Фракция, мм	Насыпной вес, кг/дм^3	Теплопроводность, W/mK
	MgO	SiO_2	Fe_2O_3				
Торкрет-масса	82-94	4-5	≤1,0	1750	0-1.0	1.6	0.5

После нанесения торкрет-покрытия промковш отстаивается в течение двух-четырех часов и затем отправляется на просушивание. Сушка ковша производится в следующей последовательности: в течение 1,5-2 часов на малом огне ковш разогревается до температуры 350-400˚С. После этого, за 1,5-2 часа на максимальном пламени ковш доводят до температуры 1100-1200˚С.

Рис.7.3. Разогрев футеровки промковша 6-ти ручьевой МНЛЗ

В случае если после разогрева промковша разливка не производится, допускается перевод в плавный режим разогрева и снижение температуры футеровки промковша до 400˚С. В настоящее время все большее распространение получают торкрет-массы, которые допускают снижение футеровки промковша до температуры окружающей среды.

Торкрет-покрытие промковшей обеспечивает следующие положительные эффекты:

- защиту от износа (разрушения) арматурного слоя футеровки и его многократное использование, что существенно сокращает расход огнеупоров;
- обеспечение заданной чистоты стали по неметаллическим включениям за счет исключения контакта стали с огнеупорами, содержащими оксиды алюминия и кремния;
- уменьшение потерь тепла металлом в промковше в силу специфики структуры торкрет-материала (при прогреве промковша нанесенный слой приобретает пористую структуру, за счет выгорания некоторых составляющих);
- беспрепятственное удаление остатков рабочего слоя после окончания разливки и охлаждения промковша и, следовательно, возможность быстрого оборота промковшей.

Основными зонами повышенного износа рабочего слоя футеровки промковша являются зона шлакового пояса и днище в области падения струи из сталеразливочного ковша.

Рис.7.4. Фотография промковша с остатком металла после разливки

Износ рабочего слоя футеровки промковша в шлаковом поясе, как правило, обусловливается агрессивностью покровной теплоизолирующей смеси по отношению магнезитовому торкрет-слою. В настоящее время в зарубежной и отечественной практике широко применяется высокоэффективное теплоизолирую-

щее покрытие на основе золы рисовой шелухи, содержащее свыше 90% SiO_2. Это обеспечивает стабильность разливки стали длинными сериями при минимальном износе футеровки промковша в зоне шлакового пояса. Расход такой теплоизолирующей смеси составляет 0,22-0,25 кг/т разливаемой стали, а колебания температуры стали в промковше в процессе разливки одного сталеразливочного ковша обычно не превышают 3-4°С. При контакте с жидкой сталью оно быстро формирует жидкую пленку толщиной 5-7 мм, которая предотвращает поглощение кислорода и азота жидкой сталью. Над тонким расплавленным слоем покрытие остается в стабильно твердом состоянии и сохраняет свои высокие изолирующие свойства и низкую насыпную плотность.

Арматурный слой футеровки промковша выполняется, как правило, на базе тиксотропных масс с низким содержанием цемента и высоким содержанием Al_2O_3, принудительно смешиваемых с малым количеством воды и уплотняемых вибраторами. Для плотной фиксации арматурного слоя используются специальные анкеры, привариваемые к кожуху промковша. Расстояние от концов анкеров до поверхности арматурного слоя футеровки составляет 40-50 мм. Обычно арматурный слой наливают по шаблону. Его стойкость составляет 800-1000 плавок. Монолитную футеровку наливают толщиной 100-120 мм для стен и 180-220 мм для днища. Допускается периодические ремонт монолитной футеровки.

Рис.7.5. Схема расположения анкеров на стенках промковша (слева) и технологическая схема изготовления арматурного слоя футеровки (справа)

Сушки наливной арматурной футеровки производится в специальном режиме и нуждается в особой точности. На первом этапе сушки требуется соблюдение температуры около 100-120°С в течение примерно 20 часов. Затем температура подогрева равномерно повышается до 850-900°С в течение 20-24 часов. Для контроля процесса разогрева целесообразно использовать систему программируемого управления и регулирования пламени. Для сушки и разогрева футеровки промковш может закрываться металлической или футерованной крышкой с отверстиями для подачи жидкой стали из сталеразливочного ковша, засыпки на зеркало металла теплоизолирующих материалов, установки стопоров или других устройств.

Одним из преимуществ такого типа футеровки (в сравнении с кирпичной), является повышение жесткости промковша в целом. Однако на практике для больших промковшей часто наблюдается быстрое появление длинных продольных трещин, что нарушает монолитность футеровки и нивелирует это преимущество. Когда футеровка износится на 40-60%, она может быть долита новым материалом после предварительной очистки кислородным или газокислородным обдувом, или методом механической обдирки.

Основные преимущества применения наливных футеровок промковшей заключаются в следующем:

- высокая оборачиваемость промковшей (в несколько раз превышающая промковши с кирпичной футеровкой);
- меньшее время подготовки и подогрева промковша перед эксплуатацией;
- увеличение числа разливаемых плавок из одного промковша;
- значительное уменьшение удельного расхода огнеупоров на тонну стали.

Между бетонной футеровкой и металлическим кожухом промковша устанавливается теплоизоляционный слой, предотвращающий потери тепла металлом через футеровку. Для этой цели применяют волокнистые теплоизоляционные материалы, например, муллитокремнеземистый войлок, фетр, картон и т.п. Тип и эффективность изоляции имеет определяющее значение при выборе температурного режима в промковше.

Таблица 7.1. Физико-технические показатели теплоизоляционного материала

Содержание, %		Температура эксплуатации,°С	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, W/mK (600°С)	Предел прочности N/mm^2
Al_2O_3	Al_2O_3 + SiO_2				
48-55	93-97	1100-1250	100-250	0,15-0,30	3-8

Для предотвращения преждевременного вывода промковша из эксплуатации вследствие повышенного износа футеровки днища в месте падения струи стали дополнительно устанавливается *металлоприемник* из высокопрочного бетона определенной геометрической формы. Он устанавливается в промковше до нанесения торкрет-покрытия и дополнительно расклинивается с помощью огнеупорных изделий.

Рис.7.6. Установка металлоприемника и перегородок в промковше

Установка *порогов и перегородок* в зону турбулентного движения потока стали позволяют продлить время нахождения металла в промковше. Точные места расположения этих элементов определяются в соответствие с геометрическими формами промковша. При применении монолитной арматурной футеровки места для установки порогов и перегородок во время заливки оставляют пустыми, а сами изделия устанавливают позднее.

ЛЕКЦИЯ №8

Промежуточный ковш - 4: изостатические огнеупоры для дозирования и защиты стали от вторичного окисления

Развитие технологических процессов непрерывной разливки стали уже в течение многих десятилетий в значительной степени обусловливает бурный прогресс в производстве корундографитовых огнеупорных изделий, обеспечивающих дозирование и защиту стали от вторичного окисления. Такие изделия производятся преимущественно методом изостатического прессования по сложной технологической схеме. К числу изостатически прессуемых изделий, применяемых при непрерывной разливке стали относятся (рис.8.1) защитная труба, устанавливаемая между сталеразливочным и промежуточным ковшом, стопор и стакан-дозатор промковша и погружной стакан, устанавливаемый между промковшом и кристаллизатором.

Рис.8.1. Схема движения стали из сталеразливочного ковша в кристаллизатор: 1 – коллектор сталеразливочного ковша; 2 – защитная труба; 3 – стопор; 4 – футеровка промковша; 5 – стакан-дозатор; 6 – погружной стакан; 7 - кристаллизатор; 8 –; 9 – теплоизолирующая смесь; 10 - шлакообразующая смесь; 11 - кольцо для подачи аргона

Изостатические изделия для непрерывной разливки стали в процессе эксплуатации подвергаются термическим ударам, механическому разрушению за счет контакта с потоками жидкой стали и химической эрозии за счет воздействия стали и шлака. Такие сложные условия эксплуатации обусловливают повышенные требования к прочности изделий и достаточно сложную технологическую систему их производства.

Производство изостатических изделий требует применения высокотехнологичного и дорогостоящего оборудования. Процесс изостатического формования включает:

- вакуумирование пресс-формы до давления <0,01 МПа для растягивания оболочки и ее плотного прилегания к внутренней поверхности перфорированной матрицы;
- засыпку шихты при одновременной вибрации в теченение 30-35 секунд с частотой 50-60 Гц и амплитудой колебания 0,5-0,8 мм;
- вакуумирование в течение 5-8 минут до остаточного давления <0,015 МПа одновременно с вибрацией и небольшим пригрузом;
- извлечение пресс-формы из вакуум-камеры и помещение ее в контейнер гидростата;
- заполнение контейнера жидкостью, приложение давления на каучуковую оболочку и гидропригруз до значения, равного 100 МПа, и выдержке в течение 30-40 секунд;
- извлечение пресс-формы из контейнера, сушку ее сжатым воздухом, разборку формы и съем прессованного изделия.

Сформированное изделие после обработки отверстия сушат в «мягком» режиме с температурой теплоносителя 80-95°С. Высушенное изделие подвергают механической обработке, которая обусловлена неточностью размеров получаемых заготовок и шероховатостью их поверхности. Затем изделия подвергают глазурированию для защиты графита от выгорания при обжиге в туннельной печи при температуре 1200-1350°С.

Достоинствами метода изостатического прессования являются равномерность распределения давления и плотности в заготовке за счет всестороннего (изостатического) сжатия; отсутствие потерь на трение и необходимости в пластификаторах; отсутствие коробления при спекании; произвольные соотношения высоты и поперечного сечения заготовок и т.п.

Защитная труба устанавливается в процессе разливки стали между сталеразливочным и промежуточными ковшами и предназначена для защиты стали от вторичного окисления на этом на участке движения. Конструкция и геометрическая форма защитной трубы может существенно изменяться в зависимости от условий разливки и требований заказчика. Износ защитных труб происходит, как правило, в зоне, контактирующей с теплоизолирующей смесью, расположенной на зеркале металла в промковше, или в зоне нижнего (погружаемого в металл) торца. В зависимости от химического состава покровной теплоизолирующей смеси и условий разливки стойкость защитной трубы может составлять до 4-6 плавок, а при соответствующем усилении в зоне шлакового пояса (например, керамикой на основе диоксида циркония) эксплуатационная стойкость может достигать 7-8 плавок и более.

На практике соединение между коллектором шиберного затвора и защитной трубой не является герметичным, что обусловливает возможность проникновения воздуха во внутреннюю полость защитной трубы за счет эффекта Вентури. Для предотвращения подсоса воздуха встык между коллектором шиберного затвора и защитной трубой рекомендуется подача аргона через распределительное кольцо, раположенное над стыком. Альтернативным вариантом защиты стыка от проникновения воздуха является создание «аргонового» барьера посредством специального жакета, расположенного непосредственно на верх-

ней части защитной трубы приспособления, расположенного в виде распределительного кольца непосредственно над стыком.

Рис.8.2. Фото продольного разреза верхней части защитной трубы с металлическим жакетом для подачи аргона

Стопор-моноблок является составляющей функциональной частью промковша МНЛЗ, обеспечивающей дозированную подачу стали в кристаллизаторы, перекрытие канала стакана-дозатора в случае технологической необходимости, подачу аргона в струю стали и пр. Точный расчет геометрии головки стопора-моноблока является крайне важным с точки зрения стабильности дозирования металла в течение длительного времени. Особенно это становится актуальным при использовании автоматических систем поддержания уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ.

Основные виды нагрузок, действию которых подвергается стопор при разливке, можно сгруппировать следующим образом:

- термические напряжения, связанные с термоударом в момент начала разливки (заполнение промковша жидкой сталью) и неравномерностью нагрева той части

стопора, которая погружена в сталь, и частью стопора, расположенной над жидкой ванной;

- изгибающие нагрузки, связанные с действием выталкивающей силы при погружении сопора в жидкую сталь, а также возникающие при закрывании отверстия стакана-дозатора стопором (при условии отклонения оси стопора от вертикали);
- эрозионный износ стопора в зоне шлакового пояса, вызывающий уменьшение площади его поперечного сечения и снижающий общую прочность цилиндрической части;
- виброударные нагрузки, связанные с некоторым вибрированием стопора в процессе разливки стали, что обусловлено условиями истечения металла через отверстие стакана-дозатора;
- нагрузки, связанные с изменением давления газа во внутренней полости стопора вследствие неравномерной (или прекращения) подачи аргона, инжектируемого в сталь.

Наибольшее распространение на практике получила схема крепления стопора-моноблока с исполнительной штангой посредством впрессовываемой в тело стопора металлической гайки или керамической. При монтаже стопора стальная штанга вкручивается в гайку, расположенную в стопоре, а затем дополнительно фиксируется внешней гайкой.

Важной особенностью стопоров-моноблоков является наличие технологической возможности вдувания аргона в струю металла в процессе разливки. Вдувание аргона через стопор-моноблок используется в качестве технологического приема, обеспечивающего стабилизацию процессов истечения металла из промковша в кристаллизатор, уменьшение эффекта зарастания («клоггинга») оксидами алюминия внутренней полости стакана-дозатора и погружного ста-

кана вследствие их флотации, а также управление глубиной проникновения струи стали в жидкой ванне кристаллизатора. Для инжектирования аргона в головке стопора предусматривается либо сквозное отверстие диаметром 5-7 мм, либо устанавливается газопроницаемая пробка. Газопроницаемая пробка служит как бы защитным элементом, предотвращающим проникновение жидкого металла во внутреннюю полость стопора в случае несанкционированного прекращения подачи аргона. Кроме того, при использовании такой пробки удается обеспечить инжекцию в виде более мелких пузырьков аргона.

Наиболее уязвимым местом при разрушении стопора на практике является его головка, подвергающаяся механическому износу и эрозии вследствие химических реакций. Поэтому на практике головка стопора выполняется из более прочного материала либо на основе смеси оксида магния и графита на углеродной связке, либо на основе смеси оксида алюминия и графита с добавками диоксида циркония на углеродной связке. Оба эти материала вполне совместимы с материалом основного тела стопора и поэтому прессуются совместно.

Стакан-дозатор, устанавливаемый в днище промковша, обеспечивает истечение стали и формирование компактной струи. Стойкость стакана-дозатора, полученного методом изостатического прессования, определяется общей прочностью материала, препятствующей его разрушению в процессе разливки, локальным разрушением стакана-дозатора в зоне его контакта с головкой стопора, скалыванием материала в месте контакта с погружным стаканом и скоростью зарастания его внутренней полости неметаллическими и шлаковыми включениями. Кроме того, при частой замене погружного стакана может происходить частичное разрушение (скалывание) нижней части стакана-дозатора, которая может быть выполнена как плоской (при стыковке «конус в конус», так и сферической при стыковке «сфера в сферу»).

В этом случае происходит свободный подсос воздуха во внутреннюю полость погружного стакана, что значительно повышает интенсивность вторичного окисления струи стали и разрушает материал изделия.

Уменьшение скорости зарастания внутренней полости стакана-дозатора может быть достигнуто с использованием специального керамического «анти-клоггингового» покрытия, принцип действия которого заключается в связывании оксидов алюминия, оседающих на поверхности стакана-дозатора, в легкоплавкие соединения. Установлено, что такое покрытие в 2-3 раза повышает длительность работы погружного стакана без промываний кислородом.

Погружной стакан является важнейшим функциональным элементом, обеспечивающим подвод струи под уровень металла в кристаллизатор, способствуя рациональной организации движения конвективных потоков в жидкой ванне, а

также защиту стали от вторичного окисления на участке «промковш–кристаллизатор». На практике различают сквозные и глуходонные погружные стаканы, имеющие два боковых отверстия для слябовых МНЛЗ и четыре – для блюмовых. В промышленных условиях вывод из эксплуатации корундографитовых погружных стаканов очень часто обусловливается либо эрозионным износом в зоне шлакового пояса, либо зарастанием их внутренней полости включениями глинозема, что препятствует нормальному течению стали из промковша в кристаллизатор.

Рис.8.3. Фотографии эрозионного износа погружного стакана в шлаковом поясе (слева) и зарастания внутренней полости включениями глинозема (справа)

Для увеличения стойкости зона шлакового пояса погружного стакана выполняется оксида циркония, который хорошо противостоит эрозионному износу. Для повышения эффективности защиты стали от вторичного окисления (а следовательно, и скорости зарастания внутренней полости) на практике используются погружные стаканы, совмещенные со стаканом-дозатором в единое изделие и устанавливаемые непосредственно в промковше. Не взирая на достаточно очевидные технологические преимущества таких погружных стаканов, следует отметить, что подготовка их к эксплуатации (точная установка в промковше с привязкой к оси кристаллизатора, подогрев изделия перед началом разливки) требует дополнительных усилий и затрат.

Перед началом разливки корундографитовые погружные стаканы нагреваются до температуры 1000-1100°С. Нагрев погружных стаканов осуществляется либо в специальных печах, либо с использованием специальных горелок.

Рис.8.4. Нагрев погружных стаканов перед разливкой

В современной практике непрерывной разливки слябовой заготовки все большее распространение получает техника быстрой замены погружного стакана. Целесообразность такой замены обусловливается возможностью исключения отходов металла со шлаковыми поясами, которые образуются при применении обычных изделий. Такая замена достигается с помощью специального приспособления, устанавливаемого под днищем промковша и обеспечивающим бы-

строе перемещение погружных стаканов (нового и старого) вдоль плоскости скольжения. Замена погружного стакана осуществляется в течение одной-двух секунд, что не нарушает нормального течения процесса разливки (не изменяется положение головки стопора, не прекращается работа системы автоматического контроля уровня металла в кристаллизаторе и т.п.). *[фильм]*

Рис.8.5. Схема быстрой замены погружного стакана в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ

Такие системы обеспечивают повышение выхода годного (за счет исключения потерь металла при замене погружного стакана по традиционной схеме) при некотором упрощении процесса монтажа и демонтажа изделий в ходе разливки. Вместе с тем стакан-дозатор и погружной стакан для такой системы оказываются, по меньшей мере, в 1,5-2 раза дороже в силу усложнения технологии их изготовления.

Следует также отметить, что рассмотренная система быстрой замены погружного стакана оказывается малоэффективной в случае интенсивного зарастания внутренней полости стакана-дозатора оксидами алюминия. Более того, при зарастании стакана-дозатора оказывается неизбежной остановка ручья МНЛЗ в силу отсутствия технической возможности «промывки» его внутренней полости.

ЛЕКЦИЯ №9

Кристаллизатор МНЛЗ - 1: формирование твердой корочки

Кристаллизатор представляет собой один из наиболее функционально важных узлов, определяющих рациональную работу МНЛЗ и оптимальное качество непрерывнолитой заготовки.

Кристаллизатор предназначен для приема жидкого металла, попадающего в него из промковша, а также перевода части жидкой стали в твердое состояние посредством интенсивного отвода тепла охлаждающей водой. Сталь из промковша попадает в кристаллизатор либо открытой струей, либо посредством подвода под уровень металла с помощью погружного стакана (рис.5.1).

Рис.9.1. Подача стали в кристаллизатор открытой струей на сортовой МНЛЗ (слева) и слябовой МНЛЗ с использованием погружного стакана (справа)

В кристаллизаторе происходит формообразование конфигурации заготовки посредством наращивания твердой корочки. Процесс формирования твердой корочки сопровождается выделением тепла в окружающую среду (стенки кристаллизатора). При этом также наблюдается явление «прихватывания» (прилипания) твердой корочки к поверхности кристаллизатора, что может приводить к прорывам в твердой оболочке. В ходе пребывания металла в кристаллизаторе от заготовки отводится от 15% до 30% всего тепла, которое аккумулировано металлом.

Особенностью работы кристаллизатора является интенсивный отвод тепла от заготовки. Так, температура стали в жидкой сердцевине заготовки, находящейся в кристаллизаторе, по крайней мере, на несколько градусов превышает температуру начала ее затвердевания (температура ликвидуса), а температура охлаждающей воды на выходе из кристаллизатора составляет 40-50°С. Характерное распределение температуры в поперечном сечении кристаллизатора и заготовки при наличии газового зазора между заготовкой и стенкой кристаллизатора представлено на рис.9.2.

Рис.9.2. Характер изменения температуры от жидкой стали до охлаждающей воды

Для сталей различных марок температура ликвидуса может колебаться от 1460°С до 1539°С. Рассчитывается температура ликвидуса по приближенным эмпирическим формулам. Например:

$$T_L = 1536 - (78*[\%C] + 7,6*[\%Si] + 4,9*[\%Mn] + 1,3*[\%Cr] + 3,1*[\%Ni] + \\ +4,7*[\%Cu] + ,6*[\%Al] +34,4*[\%P] + 38*[\%S)] \qquad [9.1]$$

Интенсивность теплопередачи по представленной схеме зависит от следующих процессов:

- конвективного движения потоков стали вдоль границы затвердевания;

- теплопередачи через двухфазную зону заготовки (и протяженности двухфазной зоны);
- интенсивности отвода тепла через затвердевшую корочку заготовки;
- теплопередачи через газовый зазор между затвердевшей оболочкой заготовки и внутренней поверхностью кристаллизатора;
- теплоотвода через медную стенку кристаллизатора;
- передачи теплоты охлаждающей воде

Наибольшее сопротивление отводу тепла от жидкого металла создает газовый зазор между поверхностью заготовки и кристаллизатором, размер которого определяется теплофизическими свойствами разливаемой стали и материала кристаллизатора, а также конфигурацией кристаллизатора. Пространство между поверхностями, образующими зазор, может быть заполнено различными газами и расплавленными потоками и твердыми частицами шлакообразующей смеси, имеющими существенно меньшую теплопроводность, чем сталь и медь. В зависимости от величины усадки в зазоре возникает и развивается теплообмен излучением. При этом непрерывно подаваемая в кристаллизатор шлакообразующая смесь создает слой шлака, уменьшающий торможение усадки стали.

Отделение корочки затвердевающего каркаса заготовки от поверхности кристаллизатора наступает в тот момент затвердевания, когда скорость усадки превышает скорость пластической деформации стали. Чем меньше сила сопротивления усадки, тем раньше образуется зазор. Следует отметить большое влияние на этот процесс химического состава стали, его интервала затвердевания и значения коэффициента линейной усадки. Основное количество тепла от затвердевающей заготовки к стенкам кристаллизатора (70-80%) отводится ниже зоны контактного теплообмена, высота которого составляет 180-250 мм.

Тепловой поток от поверхности затвердевающей заготовки к внутренней поверхности медного кристаллизатора представляет собой сочетание кондуктивной и радиационной теплопередачи:

$$q_З = \lambda_З (T_{пов} - T_{кр})/\delta + \varepsilon\sigma_o (T^4_{пов} - T^4_{кр}), \qquad (9.1)$$

где $\lambda_З$ - теплопроводность газа в зазоре при температуре $(T_{пов} + T_{кр})/2$; $T_{пов}$ - температура поверхности заготовки; $T_{кр}$ - температура внутренней поверхности кристаллизатора; δ - толщина газового зазора; ε — приведенная степень черноты контактируемых поверхностей, равная $1/\varepsilon = (1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2)$; ε_1 и ε_2 - степень черноты поверхностей заготовки и кристаллизатора; σ_o - постоянная Стефана-Больцмана, равная $\sigma_o = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2•°С).

Теплопроводность газов подсчитывают при любой температуре по следующей зависимости:

$$\lambda = \lambda_o (T/T_o)^n , \qquad (9.2)$$

где λ_o - теплопроводность при $T_o = 0$°С; T_o и T - соответственно температуры газа исходная и в процессе теплообмена.

По разным оценкам, базирующимся на прямых замерах, температура рабочей поверхности кристаллизатора обычно составляет 160-180°С. Значение этой температуры может изменяться в зависимости от ряда факторов: теплопроводности материала стенки кристаллизатора, интенсивности отбора тепла водой, толщины стенки кристаллизатора, состава и толщины рабочего покрытия и т.п.

Экспериментальными исследованиями установлено, что наиболее интенсивный отвод тепла наблюдается в зоне кристаллизатора, расположенной на 170-220 мм ниже зеркала металла (рис.9.3).

Рис.9.3. Локальный тепловой поток (*q*) [x10^7 (кДж/мин) м^2] в кристаллизаторе при различных скоростях литья низкоуглеродистой стали (1 – 2,0

м/мин; 2 – 1,5 м/мин; 3 – 0,8 м/мин) на расстоянии (*h*) от зеркала метала в кристаллизаторе

Уменьшение интенсивности теплоотвода ниже этого уровня объясняется тем фактом, что при продвижении в нижние горизонты кристаллизатора твердая корочка не всегда плотно прилегает к его внутренней поверхности. Это объясняется, в первую очередь, тем фактом, что твердый каркас просто уменьшается в размерах в силу развития усадочных явлений. Кроме того, на практике интенсивность отвода тепла по углам кристаллизатора обычно заметно ниже, чем по граням. Это объясняется быстрым отходом твердой корочки заготовки именно в углах кристаллизатора.

Для усиления контактного теплообмена (повышения интенсивности теплоотвода) между стенкой кристаллизатора и заготовкой необходимо стремиться обеспечить следующие условия:

- повышение контактного давления между заготовкой и стенкой кристаллизатора с целью регулирования (уменьшения) величины газового зазора;
- заполнение межконтактного зазора между заготовкой и кристаллизатором специальными шлакообразующими смесями, имеющими регламентируемые показатели теплопроводности и вязкости;
- нанесение на поверхность кристаллизатора специальных покрытий с регламентируемой теплопроводностью и износостойкостью;
- предотвращение повышенного локального износа и коробления стенок кристаллизатора, увеличивающих газовый зазор.

В практике разливки стали предпочтение отдается кристаллизаторам, изготовленным из первичной меди, сплавов рафинированной меди с серебром (0,15-0,2%) и другими элементами, имеющими высокую теплопроводность или повышающими прочность материала. На рабочую поверхность кристаллизаторов также наносятся специальные износостойкие покрытия на основе хроме, никеля и т.п. Для обеспечения интенсивности теплоотвода медные стенки охлаждаются проточной водой, которая подается с высоким расходом в специальные каналы.

В результате пребывания металла в кристаллизаторе должна сформироваться твердая корочка, достаточная для того, чтобы при выходе из него заготовка имела прочную оболочку, не допускающую прорывов и растрескиваний твердого каркаса. Толщину твердой корочки δ (мм) можно с достаточной точностью оценивать по приближенной эмпирической формуле (закон квадратного корня):

$$\delta = (3{,}0\ldots3{,}7)\ \tau^{0,5} \qquad (9.3)$$

где τ – время затвердевания корочки, с.

Рис.9.4. Внешний вид твердой корочки квадратной заготовки в кристаллизаторе в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении

При ухудшении контакта какой-либо части заготовки со стенкой кристаллизатора наблюдается локальное утоньшение твердой корочки, что приводит к ухудшению прочностных свойств твердого каркаса слитка в этой области. Наиболее часто это проявляется в углах заготовки (рис.9.4). Неравномерный рост твердой корочки приводит к возникновению внутренних термических напряжений в твердом каркасе. Превышение термическими напряжениями предела прочности металла при данной температуре приводит к деформации твердого каркаса (отхождению твердого каркаса в 1-2 углах) и возникновению поверхностных или внутренних трещин.

При этом такие трещины наиболее характерны для тех углов твердого каркаса, в которых наблюдается максимальная деформация корочки и ее отход от поверхности гильзы кристаллизатора. На рис.9.5 приведено фото профиля (слева) поперечного каркаса сортовой заготовки (квадрат 125 мм), отобранного на 30 мм выше прорыва, с трещиной в левом углу, и внешний вид квадратной заготовки в месте образования этой трещины.

Рис.9.5. Формирование твердой корочки при отхождении одного угла заготовки

Подчистить рисунок

Трещины возникают в том случае, когда прочность металла σ, относительная деформация ε и скорость деформации ε' определенного участка формирующейся корочки оказываются выше допускаемых, то есть когда выполняются следующие неравенства:

$$\sigma>\sigma_{кр}; \qquad \varepsilon>\varepsilon_{кр}; \qquad \varepsilon'>\varepsilon'_{кр}; \tag{9.4}$$

$$\varepsilon = \Delta l/l = \alpha\Delta Tl/l = \alpha\Delta T; \qquad \varepsilon' = \alpha\Delta T/\tau; \qquad \sigma = \varepsilon E; \tag{9.5}$$

где ε - деформация металла; ε' - скорость деформации; $\varepsilon'_{кр}$ - критическая деформация, после превышения которой образуются трещины; σ и $\sigma_{кр}$ - прочность и критическая прочность стали при высоких температурах стали; Δl - усадка рассматриваемого участка заготовки; l - протяженность участка заготовки, на котором образуются трещины; α - коэффициент усадки стали; ΔT - пере-

пад температур на рассматриваемом участке заготовке; τ - продолжительность охлаждения этого участка; E – модуль упругости стали.

Допускаемый предел прочности в зависимости от поверхности заготовки и температуры плавления заданной марки стали определяется по следующей зависимости:

$$\sigma_{кр} = \sigma_m \, \boldsymbol{e}^{\beta(1-Ts/T)} , \qquad (9.6)$$

где σ_m – напряжение вблизи температуры солидуса стали, равное по экспериментальным данным 7,5-8,0 Мпа; T_s – температура плавления стали; T – температура поверхности непрерывного слитка; β - экспериментальный коэффициент, равный 6,88; $\boldsymbol{e}$ – основание натурального логарифма.

Значение допускаемой деформации при температуре, близкой к солидусу, может быть ориентировочно определено по эмпирической формуле:

$$\varepsilon_{кр} \approx 2{,}0 \; \tau^{-0{,}55} , \qquad (9.7)$$

где τ - время затвердевания корочки.

В целом же при выходе из кристаллизатора должна сформироваться такая твердая корочка, которая оказывается достаточной для того, чтобы выдерживать воздействия на нее ферростатического давления стали, а также растягивающих напряжений, вызываемых усилиями, по вытягиванию заготовки. При разрушении твердой корочки образуется продольная трещина, через которую вытекает жидкая сталь (рис.9.6).

Такая ситуация является аварийной и приводит, по меньшей мере, к остановке ручья или МНЛЗ в целом.

В зависимости от марки стали, конфигурации заготовки и скорости разливки требуемая (с точки зрения обеспечения надежности процесса литья) толщина твердой корочки на выходе из кристаллизатора колеблется в пределах 14-18 мм для сортовых заготовок, 25-30 мм для блюмов и 25-35 мм для слябов.

Рис.9.6. Фотография прорыва металл на сортовой МНЛЗ

ЛЕКЦИЯ №10

Кристаллизатор МНЛЗ - 2: качание (осцилляция) кристаллизатора

Начало процесса образования твердой корочки при непрерывной разливке стали происходит в виде частичного охлаждения мениска в области контакта жидкого металла с кристаллизатором (вплоть до появления твердой фазхы). Как показывает практика, в процессе формирования твердой корочки может проявляться явление ее прилипания к поверхности кристаллизатора. В этом случае в корочке возникают растягивающие напряжения, которые вызываются движением (вытягиванием) заготовки из кристаллизатора. В конечном счете, в твердой корочке возникают разрывы, которые затем могут приводить к прорывам и вытеканию стали под кристаллизатором.

Рис.10.1. Фотографии наплыва на поверхности сляба, образовавшегося вследствие вытекания стали через трещину в корочке (слева) и чулка сляба после прорыва под кристаллизатором (справа)

Предотвращение прилипания и последующего разрыва образовавшейся тонкой корочки стали во время перемещения кристаллизующейся заготовки - одна из главных функций работы кристаллизатора. При разрыве твердой корочки вследствие прилипания ее часть, расположенная вблизи зеркала жидкой стали, сцепляется со стенкой кристаллизатора и отделяется от движущейся вниз корочки. На место образовавшегося разрыва проникает жидкий металл, который при

затвердевании уже не успевает образовать корочку достаточной толщины и прочности (рис.10.2). Получающееся соединение является достаточно непрочным и обычно разрывается при выходе из кристаллизатора.

Рис.10.2. Схематическое представление механизма образования прорыва под кристаллизатором вследствие прилипания и разрушения корочки

Минимизации явления прилипания твердой корочки удается достигнуть в том случае, когда усилие трения между поверхностью заготовки и стенками кристаллизатора оказывается ниже определенного критического уровня, который определяется в зависимости от прочности корочки. Снижение вероятности прилипания корочки к стенкам кристаллизатора достигается путем придания кристаллизатору возвратно-поступательных движений с определенной частотой и амплитудой. При этом в зазор между корочкой и кристаллизатором подается смазывающее вещество: шлакообразующая смесь или остатки продуктов сгорания масла.

Технология разливки металла с использованием качаний (возвратно-поступательных движений) кристаллизатора предложена З.Юнхансом (Германия) в начале 30-х годов прошлого столетия. Однако основной эффект от качания кристаллизатора был достигнут только в 50-е годы прошлого века за счет выбора таких параметров осцилляции, при которых в определенные периоды времени кристаллизатор, двигаясь в том же направлении, что и заготовка, обго-

няет ее. Этот отрезок времени называется периодом отрицательного раздевания слитка (*negative strip time*) или временем опережения.

Другим важным изменением параметров качания режимов осцилляции явился переход к синусоидальному закону движения кристаллизатора. Считается, что впервые в мировой практике синусоидальный закон колебаний применили на двух российских МНЛЗ на Новолипецком металлургическом комбинате для разливки слябов еще в 1959 году. Схема реализации синусоидального закона качания кристаллизатора представлена на рис.10.3. Для реализации этого закона качания кристаллизатора используется электропривод.

Современные МНЛЗ уже более разнообразны по конструкции и применению режимов качаний кристаллизатора. При этом кристаллизатору сообщают колебания с частотой в диапазоне 0,5-5 Гц и амплитудой 2-15 мм. В связи с этим возникает несколько вопросов. Действительно ли важно, по каким законам происходят качания кристаллизатора? Если да, то как соотносятся переменные величины между собой?

Рис.10.3. Схема электромеханического привода механизма качания кристаллизатора (синусоидальные движения): 1 – привод механизма качания; 2 – система рычагов; 3 – стол качания кристаллизатора; 4 – непрерывнолитая заготовка; 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 – места установки акселерометров

Вплоть до последних 10-15 лет синусоидальный режим колебаний рассматривался как стандартный режим, применяющийся практически на всех МНЛЗ. Это объясняется тем, что его модель достаточно проста в реализации и имеет преимущества меньших моментов инерции и меньших рывков ускорения (величина изменения ускорения во времени).

Для синусоидального закона качания кристаллизатора различают два основных критерия выбора параметров качания:

-<u>время опережения</u> τ_N , определяемое по формуле:

$$\tau_N = (1/\pi f) \arccos (-V_c / \pi f h) \qquad [10.1]$$

где V_c - скорость вытяжки заготовки;

-<u>индекс опережения</u>, устанавливающий отношение между средней скоростью движения кристаллизатора $V_m = 2 h f$ (h – величина хода кристаллизатора за один цикл качаний; f – частота колебаний) и скоростью разливки V_c.

Обычно рекомендуется обеспечивать величину времени опережения τ_N на уровне 0,25-0,30 с и более (не превышая значения 1,0 с). Для высокоскоростных сортовых МНЛЗ величина времени опережения выбирается на уровне 0,12-0,14 с. При этом оптимизация величины τ_N осуществляется не только из соображений минимизации вероятности прорывов и обрывов заготовки, но и из условия уменьшения глубины проникновения следов качания. При оптимизации параметров качания кристаллизатора с помощью индекса опережения обычно рекомендуется принимать его оптимальное значение на уровне 1,25-1,40.

В последнее время основная доля новых и реконструированных МНЛЗ оснащается кристаллизаторами с гидроприводами, которые позволяют осуществлять несинусоидальный режим качаний (рис.10.4). Считается, что несинусоидальные режимы качания позволяют существенно повысить скорость разливки и улучшить качество поверхности и подповерхностных слоев заготовки.

Рис.10.4. Графики изменения скорости движения кристаллизатора для синусоидального и несинусоидального закон с частотой цикла 2 Гц

Рис.10.5. Привод качания кристаллизатора: электромеханический для сортовой МНЛЗ (слева) и гидравлический для слябовой МНЛЗ (справа)

В результате качаний кристаллизатора на поверхности заготовки формируются поперечные углубления в виде канавок, которые принято называть «следами качания» (рис.10.6). Характер расположения следов качания позволяет судить об особенностях поведения твердой корочки в кристаллизаторе. Нормальным положением следов качания считается их параллельное расположение друг относительно друга с одинаковым расстоянием между следами. Любые отклонения от такой картины следует рассматривать либо как сбои в работе механизма качания, либо прилипания корочки вследствие недостаточной смазки поверхности кристаллизатора.

Рис.10.6. Характер расположения следов качания на поверхности заготовки (слева) для двух различных режимов качанияи вид следа качания в поперечном сечении (справа)

Интервал (или шаг) A между следами качания определяется в зависимости от скорости вытяжки заготовки V_p и частоты качаний по формуле:

$$A = V_c / f, \qquad (10.2)$$

Важным параметром оптимизации качания кристаллизатора является глубина проникновения следов качания, которая может колебаться от нескольких десятых миллиметра до 1,5-2,0 мм и более. Это представляется весьма важным фактором уже потому, в кристаллизаторе корочка является непрочной и тонкой. Следовательно, следы качания еще больше уменьшают ее прочность, что может приводить к поперечным трещинам и прорывам. Обычно максимальная глубина проникновении следов качания наблюдается в области углов заготовки, что обусловлено более низкой температурой жидкой стали на этих участках. Наименьшая глубина следов качания наблюдается, как правило, в середине грани.

Глубина следов качания зависит от способа разливки: при низкой частоте качаний (<130 циклов/мин) разливка с ШОС приводит к образованию более глубоких меток, чем при литье открытой струей. При увеличении частоты качаний данное соотношение практически не меняется. Другим важным параметром, влияющим на глубину следов качания, является скорость разливки: более высокая скорость разливки приводит к образованию менее глубоких следов качания. Следовательно, если требуется свести к минимуму глубину проникновения следов качания, то, в первую очередь, следует повысить скорость разливки до уровня допускаемого другими технологическими параметрами.

При заданной скорости разливки и размахе качаний кристаллизатора глубина следов качания уменьшается при возрастании частоты качаний. Другими словами, глубина следов качания уменьшается с уменьшением величины интервала между следами качания.

Глубину проникновения следов качания d_c (мм) представляется возможным определить по эмпирической формуле:

$$d_c = 0{,}65 \times 1{,}145^A \times (200 \times 0{,}9^A)\, t_N \qquad [10.3]$$

Различают, по меньшей мере, два механизма образования следов качания кристаллизатора: для разливки открытой струей с маслом и для разливки под уровень со шлакообразующей смесью.

При разливке открытой струей с маслом процесс формирования твердой корочки можно представить следующим образом (рис.10.7).

Рис.10.7. Динамика формирования и движения твердой корочки во время качания кристаллимзотора (разливка без ШОС)

При движении кристаллизатора вверх и заготовки вниз на поверхности кристаллизатора образовывается и нарастает новый пояс твердой корочки. Рост корочки продолжается и при движении кристаллизатора вниз. На участке опережения эта корочка «догоняет» основной твердый каркас и сваривается с ним. При этом глубина следов качания зависит от эффективности стыковки твердой корочки основного каркаса и твердой корочки нового пояса. Если пояс твердой корочки не стыкуется с твердым каркасом, то возможным вариантом является прорыв под кристаллизатором вследствие недостаточной толщины корочки. Если же пояс твердой корочки упирается в твердый каркас и как бы продолжает движение вместе с кристаллизатором, то может произойти деформация вершин твердого каркаса, при которой он загибается вовнутрь. В этом случае глубина следа качания увеличивается.

При разливке под уровень со шлакообразующей смеси характер формирования твердой корочки существенно изменяется (рис.10.7). Это, прежде всего, объясняется тем фактом, что в зазор между корочкой и кристаллизатором попадает достаточно жидкой шлакообразующей смеси, обеспечивающей смазку между ними в процессе движения, что препятствует разрушению твердой корочки и ее отрыву от твердого каркаса. Собственно твердая корочка появляется уже в

углу мениска. Дальнейшее движение твердого каркаса обусловливает затекание жидкой стали поверх твердой корочки, а затем процесс повторяется в соответствии с циклами качания кристаллизатора. [фильм)]. Определенная часть вершины твердой корочки оплавляется в более низких горизонтах жидкой ванны кристаллизатора.

Рис.10.7. Динамика формирования и заворотов твердой корочки во время качания кристаллизатора (разливка с ШОС)

ЛЕКЦИЯ №11

Кристаллизатор МНЛЗ - 3: Общие сведения о шлакообразующих смесях и особенностях их работы в кристаллизаторе

При истечении стали из промковша в кристаллизатор в жидкой ванне металла формируются конвективные потоки, а также волны на зеркале металла. Характер движения потоков стали при разливке открытой струей и при разливке под уровень существенно отличаются (рис.11.1). [фильм 1 и 2]

Рис.11.1. Характер движения потоков стали в кристаллизаторе при разливке открытой струей (слева) и под уровень (справа)

Основные процессы перемещения жидкого металла в кристаллизаторе заключаются в следующем.

1. Вертикальное движение струи металла из промковша в кристаллизатор. При разливке открытой струей металл продолжает двигаться вертикально вниз и непосредственно в жидкой ванне заготовки, проникая на глубину в несколько метров. При использовании погружного стакана струя металла проникает в жидкую ванну заготовки под углом, соответствующим углу наклона отверстий в погружном стакане.
2. Конвективные потоки в жидкой ванне заготовки, обусловленные внедрением в расплав струи (или струй) металла, вытекающей из промковша (погружного

стакана).

3. Волновые процессы на зеркале металла в кристаллизаторе, которые негативно влияют на качество поверхности заготовки вследствие захвата шлакообразующей смеси.
4. Бурление поверхности металла при разливке открытой струей или при вдувании аргона через стопор-моноблок.

Для улучшения процесса скольжения твердой корочки вдоль поверхности кристаллизатора, а также защиты зеркала металла от контакта с атмосферой, применяют специальные шлакообразующие смеси (ШОС) подаваемые в определенном количестве на поверхность металла в кристаллизаторе. При этом некоторая часть ШОС, которая расположена непосредственно на зеркале металла, расплавляется и затекает в зазор между кристаллизатором и твердой оболочкой стали, выполняя роль смазки.

Рис.11.2. Схема разливки стали на МНЛЗ с использованием ШОС (слева) и продолный разрез «носика», отобранного из кристаллизатора слябовой МНЛЗ (справа)

Расположенная на зеркале металла ШОС под воздействием тепла жидкой стали образует три ярко выраженных слоя: *жидкий слой*, расположенный непосредственно зеркале стали; *размягченный* (спеченный) слой, расположенный над жидким слоем, который по мере расходования жидкого слоя подпитывает его;

порошкообразный слой, расположенный над размягченным слоем, который уменьшает отвод тепла через зеркало металла.

Жидкий слой ШОС выполняет следующие важнейшие функции:

- предотвращения вторичного окисления при контакте зеркала металла с атмосферой;
- ассимиляции всплывающих в шлак неметаллических включений;
- уменьшения силы трения между заготовкой и стенкой кристаллизатора за счет наличия жидкой прослойки шлака;
- повышения равномерности и регулирования интенсивности теплоотвода от твердой корочки к стенке кристаллизатора;
- повышение качества поверхности непрерывнолитой заготовки.

При затекании жидкой ШОС в зазор между поверхностью заготовки и кристаллизатора образуется тонкая пленка, состоящая из слоя стеклообразной пленки, намерзающей на стенки кристаллизатора; слоя кристаллической шлаковой пленки, расположенной на стеклообразной пленке; жидкого слоя, прилегающего к поверхности заготовки. При этом в области зеркала металла из ШОС формируется (намерзает) так называемый «носик», который во многом и определяет первичную геометрическую форму твердой корочки в области зеркала.

Таким образом, затекание ШОС в зазор между твердой корочкой и поверхностью кристаллизатора, является обязательным условием стабильной работы МНЛЗ. Соответственно, для обеспечения процесса затекания ШОС должна иметь определенную совокупность физико-химических свойств. Основными свойствами принято считать:

- вязкость жидкой ШОС во всем рабочем диапазоне температур;
- температура "излома" (температура начала выделения кристаллической фазы);
- температуры размягчения, плавления и растекания ШОС.

Рекомендуемая глубина жидкого слоя ШОС для условий разливки со скоростью примерно до 1 м/мин составляет 8-10 мм, а для высокоскоростных МНЛЗ – 18-20 мм.

Одним из технологических параметров, которые характеризуют работу ШОС в кристаллизаторе является удельный расход Q_s в кг на м^2 кристаллизатора, который рекомендуется определять по следующей формуле:

$$Q_s = 7{,}6\, Q_1 / R \qquad [11.1]$$

где Q_1 - расход ШОС в кг на тонну стали; R - периметр поперечного сечения кристаллизатора в метрах; *7,6* –плотность стали в т/м^3.

Удельный расход ШОС при разливке сортовой заготовки колеблется в пределах 0,07-0,15 кг/м^2, для блюмов – 0,15-0,30 кг/м^2, для круга – 0,20-0,25 кг/м^2, для слябов – 0,30-0,60 кг/м^2. Повышение удельного расхода смеси объясняется толщиной жидкой пленки шлака между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора. По разным оценкам оптимальная толщина жидкого слоя смеси между поверхность заготовки и стенкой кристаллизатора для сортовой заготовки равна 0,04-0,05 мм, для круга – 0,08-0,10 мм, для блюма – 0,08-0,15 мм, а для сляба – 0,15-0,23 мм.

При тонком слое расплавленной ШОС режим теплоизоляции нарушается, что приводит к пониженному образованию гарнисажа, образованию большого «носика» мениска, возникновению зон захолаживания стали в кристаллизаторе, вторичному окислению стали и т.п. Избыточное введение ШОС приводит к поглощению части шлака сталью, деформации мениска, науглероживанию металла, неравномерному расплавлению смеси, что способствует провоцированию прорывов, образованию шлакового кольца и углублению следов качания.

Анализ известных данных показывает, что существует определенный диапазон состава ШОС, который обеспечивает необходимые технологические свойства ШОС для разливки слябов, блюмов и сортовых заготовок. На рис.11.3 приведена «псевдо» тройная диаграмма, представляющая те шлакообразующие смеси, которые используются для разливки различных марок сталей. При этом координата “SiO_2” включает в себя сумму $x(SiO_2)+ x(Al_2O_3)$; координата “CaO” включает сумму $x(CaO) + x(MgO) + x(FeO+MnO)$, а координата *“NaF”* включает сумму $x(Na_2O) + x(F)$.

Рис.11.3. Тройная диаграмма для сравнения ШОС, использующихся для различных марок сталей и сечений заготовки МНЛЗ

Как видно из приведенных данных, шлакообразующие смеси имеют достаточно ограниченную область на приведенной диаграмме. Для качественных легированных сталей, например, необходимым условием является поддержание соотношения "*CaO*" / "SiO_2" ≥1. Для ШОС, используемых при разливке сортовых заготовок на высокоскоростных МНЛЗ для получения необходимых характеристик несколько увеличивают содержание фтора, являющегося сильным разжижителем.

Шлакообразующая смесь (ШОС) для кристаллизатора представляет собой мелкодисперсную многокомпонентную (4-6 компонентов) систему, основными составляющими которой являются C, CaO, SiO_2, B_2O_3, $Na(K, Li)_2O$ и соединения фтора, которыми могут быть CaF_2, NaF и пр. Помимо основных компонентов, в ШОС обычно содержится некоторое количество примесей: Al_2O_3, MgO, BaO, MnO, Fe_2O_3. Диапазон содержания компонентов используемых в настоящее время ШОС приведен в табл.11.1.

В табл.11.2 приведены исходные материалы, обычно используемые для производства ШОС, и основные компоненты, содержащиеся в них.

Табл.11.1. Диапазон содержания компонентов ШОС

Функциональное предназначение	Химическое соединение	Содержание в ШОС, % (масс.)
Стеклообразующие оксиды	SiO_2 Al_2O_3 B_2O_3 Fe_2O_3	17-56 0-13 0-19 0-6
Основные оксиды	CaO MgO BaO	22-45 0-10 0-10
Щелочные оксиды	Na_2O K_2O Li_2O	0-25 0-5 0-2
Разжижители	F MnO	2-15 0-10
Регулятор скорости плавления	C	2-22

Табл.1.2. Исходные материалы для производства ШОС и их основные компоненты

Исходный материал	Основной компонент, входящий в материал
Полевой шпат, волластонит, перлит, сподумен, диатомит, бой стекла, силикатная глыба, зола	SiO_2
Цемент, глины, волластонит, известь	CaO
Нефелин, сода, силикат натрия, фторосиликат натрия, природное высоконатриевое стекло	Na_2O
Флюорит, криолит, силикат натрия и пр.	F
Бура	B_2O_3
Графит, кокс	C

Основными технологическими свойствами ШОС являются вязкость, температура начала выделения кристаллической фазы, температуры затвердевания, размягчения, плавления и растекания ШОС и пр. Требуемые технологические и эксплуатационные свойства ШОС достигаются правильным выбором соотношения между компонентами, входящими в конкретную ШОС.

Вязкость ШОС определяют либо расчетным путем (формула П.Рибоуда), либо экспериментально (ротационным или вибрационным методами).

$$\eta = A \cdot T \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right), \qquad (\text{Па}\cdot\text{с}) \qquad (11.2)$$

где $A = \exp\left(-20{,}81 + 1{,}73X_{CaO} + 5{,}82X_{CaF_2} + 7{,}02X_{Na_2O} - 35{,}75X_{Al_2O_3}\right)$;

$B = 31140 - 23896X_{CaO} - 46351X_{CaF_2} - 39519X_{Na_2O} + 68833X_{Al_2O_3}$;

T – температура шлака, К;

$X_{CaO} = x_{CaO} + x_{MgO} + x_{FeO} + x_{Fe_2O_3} + x_{MnO} + x_{B_2O_3}$;

$X_{SiO_2} = x_{SiO_2} + x_{P_2O_5} + x_{TiO_3} + x_{ZrO_3}$; $X_{Al_2O_2} = x_{Al_2O_2}$; $X_{CaF_2} = x_{CaF_2}$;

$X_{Na_2O} = x_{Na_2O} + x_{K_2O} + x_{Li_2O}$;

x_{CaO}, x_{MgO} … - мольные доли *CaO, MgO.*

Эта формула справедлива для ШОС, имеющих следующий диапазон химических составов (% масс.): 33<SiO_2<56; 0<Al_2O_3<11; 12<CaO<45; 0<Na_2O<20; 0<CaF_2<20. Расхождение результатов расчета вязкости ШОС по вышеприведенной формуле с экспериментальными результатами составляет не более ± 20 %.

Результаты экспериментов по измерению вязкости ШОС являются источником для получения информации о температуре начала выделения кристаллической фазы в пленке шлака (температуре кристаллизации шлака, температуре «излома»).

Температура начала выделения кристаллической фазы играет огромную роль в работе шлакообразующей смеси в зазоре между слитком и кристаллизатором. Эта температура при данных условиях разливки "определяет" как глубину затекания жидкого шлака в зазор между слитком и кристаллизатором, так и толщину жидкого слоя ШОС, а следовательно, условия смазки формирующегося слитка и теплопередачи от слитка к кристаллизатору.

Температуру затвердевания определяют по точке излома на кривой "логарифм динамической вязкости η – обратная температура" (см. рис.11.4). Опыт показывает, что не все шлакообразующие смеси имеют излом на указанной кривой (рис.11.4 б). В этих смесях при затвердевании не выделяется кристаллическая фаза, то есть такие смеси образуют при затвердевании стекловидную фазу. Этот факт используют при проектировании составов ШОС для различных условий разливки с целью регулирования величины теплового потока от слитка к кристаллизатору (чем выше содержание кристаллической фазы в пленке шлака, тем ниже тепловой поток от слитка к кристаллизатору).

а) б)

Рис.11.4. Зависимость "логарифм динамической вязкости – обратная температура" для шлаков: а) с точкой излома (кристаллический шлак); б) без точки излома (стекловидный шлак)

Важные свойства ШОС описываются параметрами *интервала плавления*, который характеризуется *температурами размягчения, плавления и растекания* ШОС. От величины этих характеристик зависит толщина слоя жидкого шлака на поверхности жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ.

Температурой размягчения считают температурный интервал, в котором начинается изменение исходной твердой формы формы образца исследуемого материала (округление краев, коробление, деформация и т.п.). *Температурой плавления* называют такое значение температуры, при котором образец принимает геометрическую форму капли или начинает смачивать подложку. *Температурой растекания считают* такую температуру, при которой капля полностью растекалается по подложке.

По физическому состоянию ШОС делятся на порошкообразные и гранулированные. *Порошкообразные смеси* изготавливаются путем простого измельчения исходных компонентов с последующим их смешением. Производство грану-

лированных ШОС, помимо измельчения исходных материалов, включает в себя операцию гранулирования смеси в специальных устройствах – грануляторах.

По сравнению с порошкообразными шлакообразующими смесями *гранулированные смеси* имеют ряд технологических преимуществ:

●более однородный химический состав обеспечивает гомогенное шлакообразование в кристаллизаторе;

●лучшая сыпучесть (текучесть) способствует равномерному распределению гранулята по зеркалу металла в кристаллизаторе;

●возможность автоматической подачи ШОС;

●предотвращение пылеобразования при использовании и транспортировке;

●меньшая гигроскопичность, что упрощает условия хранения.

Подача ШОС в кристаллизатор осуществляется либо оператором вручную определенными порциями, либо в автоматическом режиме с помощью специальных приспособлений. В любом случае поддержание стабильного точного уровня ШОС в кристаллизаторе является важным фактором с точки зрения обеспечения плавной работы МНЛЗ и хорошего качества поверхности заготовок.

На рис.11.6 приведена схема автоматической подачи ШОС в кристаллизатор с использованием дозатора шнекового типа.

Рис.11.6. Схема установки устройства для автоматической подачи ШОС

Таблица 11.3. Примерные свойства ШОС, рекомендуемых для разливки слябов

Показатель	Сталь				
	С очень низким содержанием углерода	Низкоуглеродистая	Перитектическая	Среднеуглеродистая	Высокоуглеродистая
Содержание углерода, %	<0,005	0,005-0,08	0,08-0,17	0,08-0,35	>0,35
Скорость разливки, м/мин	1,2-2,0	1,2-2,0	0,6-1,5	0,6-1,5	0,6-2,0
Требования к смесям					
Содержание углерода, %	<2,0	3,0-7,0	3,0-5,0	3,0-5,0	6,0-8,0
Интервал плавления, °С	960-1140	1020-1130	1040-1200	1000-1150	980-1100
Температура кристаллизации шлака, °С	950-1050	1050-1100	1140-1220	1140-1220	950-1100
Время расплавления при 1250 °С, с	50	100-150	50-100	50-100	50-100
Основность	0,9-1,2	0,7-0,9	1,0-1,3	1,0-1,3	0,7-1,0
Вязкость при 1300 °С, Па·с	0,14-0,30	0,08-0,12	0,12-0,22	0,12-0,22	0,08-0,12

ЛЕКЦИЯ №12

Кристаллизатор МНЛЗ - 4: конструктивные особенности кристаллизаторов

В конструктивном плане кристаллизатор представляет собой сборочную единицу, в состав которой входит внутренняя медная рубашка, непосредственно контактирующая с расплавленным металлом, и жесткий стальной корпус, выполняющий функцию фиксирования медной рубашки. Основное требование к кристаллизатору - это получение однородной затвердевающей оболочки в заготовке посредством эффективной однородной теплопередачи. Между медными стенками кристаллизатора и стальным корпусом предусматривается зазор, через который с определенным расходом пропускается охлаждающая вода.

Рис.12.1. Общая схема кристаллизатора МНЛЗ: 1 – стальной кожух; 2 – внутренняя медная стенка; 3 – подводящий воду патрубок; 4 – отводящий воду патрубок

Кристаллизаторы МНЛЗ охлаждаются водой высокого качества, часто деминерализованной, и снабжены оборотной системой. Обычно в технических условиях оговаривается, что оборотная система должна обеспечивать минимальную скорость потока воды в каналах системы охлаждения порядка 7-8 м/сек. Кристаллизаторы неизменно сужаются вовнутрь, для обеспечения наилучших

условий затвердевание стали. Эта конусность зависит от размеров заготовки, скорости литья, марки стали и т.п.

Обычная длина кристаллизатора еще до недавнего времени составляла 700 мм при минимальных размерах от 500 мм до максимальных 1200 мм. Современная концепция кристаллизаторов предполагает длину порядка 900-1000 мм, что увеличивает толщину твердой корочки заготовки на выходе из кристаллизатора при литье на более высоких скоростях.

Медные кристаллизаторы бывают двух типов: гильзовые и сборные. В обоих случаях они изготавливаются либо из рафинированной меди, либо из сплава с серебром или сплавов меди с хромом и цирконием. Для повышения эксплуатационной стойкости на внутреннюю поверхность кристаллизатора наносятся специальные защитные покрытия на основе хрома или никеля.

Хромовое покрытие – традиционное износостойкое покрытие внутренней поверхности кристаллизатора. Его применяют непосредственно на медных пластинах при разливке блюмовой и сортовой заготовки, а также как износостойкое покрытие, ослабляющее трение между никелем и медью в слябовых МНЛЗ. Твердость хрома равняется около 900 HV, но толщина напыления хрома ограничена 0,12-0,13 мм (в слябовых МНЛЗ) и приблизительно 0,20-0,22 мм (сортовая МНЛЗ). На сегодняшний день основные задачи применения хрома – снижение трения и уменьшение прилипания в кристаллизаторе при резком изменении уровня металла при запуске. Кроме того, производители гильз используют различного рода трехслойные покрытия типа никель (+фосфор) – кобальт - хром, которые существенно повышают стойкость гильз, но удорожают их стоимость

Гильзовые кристаллизаторы обычно применяются для отливки сортовой квадратной заготовки сечением до 220-250 мм, а также для отливки круглой заготовки. К преимуществам гильзовых кристаллизаторов относятся низкие удельные производственные затраты, более высокая скорость разливки, быстрый и однородный рост твердой корочки, высокое качество поверхности благодаря уменьшению сил трения между заготовкой и гильзой кристаллизаторе. Эксплуа-

тационная стойкость гильзовых кристаллизаторов может составлять 20-25 тыс. т жидкой стали.

Рис.12.2. Общий вид гильз кристаллизаторов (слева) и кристаллизатора сортовой МНЛЗ в сборе (справа)

Промышленное использование гильзовых кристаллизаторов показывает, что они позволяют достичь высокой скорости литья для заготовок малого сечения (до 6-7 м/мин). При этом благодаря улучшению условий теплопередачи по всей длине кристаллизатора, технологическая длина кристаллизатора увеличивается до 1000-1200 мм. Вместе с тем, следует отметить, что при использовании с так называемым «параболических» или многоступенчатых гильз кристаллизаторов может наблюдаться повышенное трение заготовки на выходе из него, что вызывает повышенный износ стенок гильзы в случае излишней его конусности. Наиболее ярко это проявляется в области углов слитка в нижней части кристаллизатора.

Интенсивность отвода тепла в гильзах существенно повышается за счет уменьшения величины воздушного зазора зазора между стенкой гильзой кристаллизатора и корочкой непрерывного слитка (рис.12.3). Воздушный зазор может быть устранен или, по крайней мере, сокращен до минимума, а теплопередача оптимизирована, если контур кристаллизатора будет в максимальной степени соответствовать контуру корки непрерывного слитка. На практике поправка на естественную усадку непрерывнолитого слитка осуществляется путем выполне-

ния внутренней поверхности гильзы кристаллизатора либо в виде многоступенчатого конуса, либо в виде называемого параболического профиля. Эта концепция в целом обеспечила рост скорости вытяжки заготовки в среднем в 1,5-2,5 раза в сравнении с одноконусной и двухконусными гильзами.

Рис.12.3.Схема прилегания корочки заготовки к поверхности одноконусной и многоконусной (параболической) гильзы кристаллизаторов	**Рис.12.4. Характерный вид износа внутренней поверхности гильзы (вид с нижнего торца**

Рис.12.5. Сравнение внутренних профилей гильз различных фирм-производителей (заготовка сечением 120х120 мм)

Сборные кристаллизаторы представляют собой конструкцию из четырех медных плит и используются для блюмовых и слябовых МНЛЗ. Медные рабочие стенки выполняются достаточно толстыми (50-60 мм) и в них вырезаются пазы для прохода охлаждающей воды. Длина кристаллизатора обычно составляет 0,7-1,1 м.

Различают 2 типа конструкции сборных кристаллизаторов: веерную и коробчатую. Веерная схема используется преимущественно для блюмовых МНЛЗ. При этом после определенного износа внутренней поверхности плиты перестрагиваются, что позволяет использовать их до 5–6 кампаний. Коробчатая конструкция используется для слябовых и блюмовых МНЛЗ. Такая конструкция дает возможность менять ширину сляба и блюма в процессе разливки, а так же менять конусность боковых граней. При этом внутренняя поверхность кристаллизаторов имеет защитное покрытие.

Рис.12.6. Сборный кристаллизатор для блюмовой (слева) и фасонной (справа) заготовки

Конструкция слябовых кристаллизаторов имеет коробчатую архитектуру. При этом в современных кристаллизаторов в конструкции слябового кристаллизатора предусматривается возможность перемещения боковых стенок как с целью изменения ширины разливаемого сляба, так и с целью коррекции конусности боковых граней. Изменение ширины достигается осторожным перемещением узких сторон, которые являются энергетическими отрегулированными внутрь или за пределы в ходе процесса литья. Регулировка происходит в течение про-

межутка времени и приводит к конусности сляба, на которую необходимо обратить особое внимании при последующем нагреве заготовки. Максимум скорости изменения ширины сляба оценивается на уровне 200 мм в минуту за счет тщательно подобранной последовательности перемещения узкой стороны кристаллизатора. Регулировка ширины сляба непосредственно в ходе литья может приводить к увеличению производительности МНЛЗ на 30-50 %, снижению затрат на огнеупоры на 30-50 %, и значительный экономии энергии.

Рис.12.7. Сборный кристаллизатор для отливки слябов: 1-стальные стенки; 2-медные плиты; 3-каналы для охлаждающей воды; 4-узкие медные стенки

На многих заводах до настоящего времени применяются кристаллизаторы с цилиндрическими сверленными в медных стенках отверстиями диаметром 20 мм с шагом 30-40 мм. При этом толщина медной стенки составляет 60-80 мм, а расстояние от рабочей поверхности до поверхности каналов охлаждения – 30 мм. Допустимое минимальное расстояние от рабочей поверхности до поверхности каналов охлаждения после перестрожки - 10 мм. Материал широкой стенки – медь, а узкой - медь с серебром. Скорость течения воды в каналах охлаждения 6-8 м/с. Более прогрессивным решением, упрощающим изготовление плит кристаллизатора следует считать использование плит с прямоугольными фрезерованными каналами. Каналы водяного охлаждения получают методом фрезерования внешних сторон медных пластин сверху донизу. Габариты этих нарезных каналов составляют приблизительно 15 мм по ширине и 5 мм в глубину.

Рис.12.8. Медная панель широкой грани кристаллизатора с каналами водяного охлаждения (слева) и узкой грани (справа)

Для повышения эксплуатационной стойкости на рабочую поверхность медных плит кристаллизаторов наносится специальное защитное покрытие толщиной около 0,08-0,12 мм. Узкие грани имеют наибольший износ, поскольку они могут перемещаться внутри полости кристаллизатора и устанавливаются с большей конусностью по сравнению с широкими гранями. Изменения линейной скорости, условий литья, марок стали, ширины заготовки и т.п. оказывают гораздо большее воздействие на состояние покрытия узких граней, чем широких. Для слябовых кристаллизаторов стойкость без покрытия составляет 150-250 плавок, а с покрытием – 1200-1500 плавок.

Рис.12.9. Характерные зоны износа медных плит слябового кристаллизатора

Между тем износ отдельных зон внутренней поверхности кристаллизатора может самым существенным образом влиять на качество поверхности сляба. При этом на стойкость кристаллизатора достаточно сильно влияет скорость вытяжки

заготовки. Например, при увеличении скорости разливки на литейно-прокатном агрегате с 4,6 до 5,2 м/мин стойкость кристаллизатора уменьшилась примерно в 2,4 раза (по данным одного европейского завода). Это следует рассматривать как свидетельство того, что при повышении скорости разливки тепловая и механическая нагрузка на стенки кристаллизатора существенно возрастает.

При этом защитное покрытие на внутренней поверхности слябового кристаллизатора может быть выполнено из никеля, никелевых сплавов, хрома, а также металлокерамики. Твердость таких покрытий варьируется от 220 до 1200 HV, а теплопроводность – от 90 до 30 Вт/(м К). Варьируя тип покрытия для различных условий разливки стали можно достичь существенного снижения поверхностных и подповерхностных дефектов (например, паукообразных трещин).

Рис.12.10. Фото фрагментов плит слябовых кристаллизаторов после эксплуатации

Рис.12.9. Кристаллизатор слябовой МНЛЗ в сборе (вместе с приводом)

ЛЕКЦИЯ №13

Зона вторичного охлаждения - 1: основные конструктивные решения для поддержки и направления движения заготовки

Обычно, говоря о зоне вторичного охлаждения (ЗВО), подразумевают ту часть МНЛЗ под кристаллизатором, где охлаждение заготовки происходит интенсивнее, чем просто при охлаждении на воздухе. Следовательно, зона вторичного охлаждения заготовки начинается непосредственно под кристаллизатором. Это обусловливается тем фактом, что твердая корочка металла, сформировавшаяся в кристаллизаторе, еще весьма тонкая и недостаточно прочная и требует дальнейшего наращивания. В современных МНЛЗ протяженность ЗВО может составлять от 8-10 м до несколько десятков метров. При этом она может продолжаться вплоть до тянуще-правильной клети.

Конструкция ЗВО состоит из системы опорных элементов (роликов), поддерживающих и направляющих заготовку, и устройств, обеспечивающих охлаждение слитка за счет впрыскивания охлаждающей воды, расположенных между роликами. Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО обычно разбивается на несколько секций (как правило, от 3-4 до 10-12)

Рис.13.1. Схематическое изображение ЗВО слябовой МНЛЗ с разбивкой на сегменты

Опорные ролики направляют движение заготовки и предотвращают деформацию (выпучивание) граней слитка под действием ферростатического давления. Непосредственно под кристаллизатором, где оболочка заготовки имеет небольшую толщину и прочность, ее деформация может приводить к прорывам металла, а в нижних зонах вторичного охлаждения – к образованию трещин и ликвационных полосок вблизи фронта затвердевания.

Точность расположения опорных роликов является весьма важным элементом в системе обеспечения качества непрерывнолитой заготовки, поскольку любые отклонения положения роликов от номинальной позиции приводят к дополнительной деформации заготовки в процессе ее движения по ЗВО.

В конструкционном плане ЗВО выполнена из отдельных сегментов, представляющих собой две сварные рамы с роликами, стянутых между собой специальными стяжками. Диаметр ролика может составлять 120-300 мм (в зависимости расположения в ЗВО). Меньшие диаметры роликов используются в верхних зонах ЗВО, что требуется в максимальной степени ограничивать выпучивание твердой корочки. Разбивка ЗВО на сегменты упрощает монтажные работы на МНЛЗ позволяет выполнять настройку сегментов за пределами МНЛЗ.

Рис.13.2. Расположение поддерживающих роликов в Зоне О под кристаллизатором (слева) и сегмент роликовой проводки (справа)

Опорные ролики МНЛЗ работают в достаточно сложных условиях, поскольку находятся в зоне повышенных температур и испытывают высокие нагрузки, связанные с поддержкой заготовки. Поскольку рабочая поверхность роликов контактирует с поверхностью заготовки, то ролики подвергаются температурному воздействию.

Ролик (слябовые МНЛЗ) состоит из трех обечаек, опирающихся на четыре подшипника качения, установленные в подушках (рис 13.3). Внутри оси выполнен канал охлаждения, в противоположные концы которого установлены специальные вертлюги для подвода и отвода охлаждающей воды. В подушках подшипников также выполнены каналы охлаждения для защиты наружного кольца подшипника.

Рис.13.3. Конструкция комбинированного ролика слябовой МНЛЗ (слева) и расположение роликов в поддерживающей секции

Особое место при выборе оптимальных размеров диаметров поддерживающих роликов и расстояния между ними занимают соображения выпучивания оболочки твердой корочки под действием ферростатического давления (рис 13.4). Усилия, возникающие в этом случае настолько велики, что они могут кардинально деформировать твердую корочку.

На рис.13.5. представлена фотография деформации сляба в верхней части ЗВО при отсутствии поддерживающих роликов. При этом следует иметь в виду, что деформация твердой корочки происходит в каждой паре роликов. Это, в ко-

нечном счете, может приводить к образованию внутренних трещин в твердой корочке, что существенным образом снизит качество заготовки.

Рис.13.4. Схема выпучивания твердой корочки заготовки в ЗВО

Рис.13.5. Деформация твердой корочки сляба при отсутствии поддерживающих роликов

В процессе движения слитка по ЗВО происходит изменение (уменьшение) ее геометрических размеров вследствие усадки стали. Поэтому положение роликов в ЗВО обязательно учитывает конусность непрерывно-литой заготовки и к ней привязывается положение каждого ролика. На практике точность положения роликов вдоль технологической оси колеблется в пределах от 0,05 до 0,1 мм. В

процессе эксплуатации МНЛЗ положение опорных роликов контролируется и корректируется в случае необходимости.

Функции поддерживающих устройств не ограничиваются только сохранением геометрической формы заготовки. Кроме того, заготовку необходимо непрерывно вытягивать из кристаллизатора, перемещать ее вдоль технологической линии МНЛЗ одновременно с ее выпрямлением (а для криволинейных МНЛЗ еще и загибом). Для вытягивания заготовки необходимо создать усилие между роликами и формирующимся слитком. При этом для того, чтобы уменьшить растягивающие усилия, действующие во время вытягивания на его оболочку, целесообразно распределить приводные ролики по всей длине технологической линии. В большинстве случаев делают приводными часть нижних роликов, распределяя приводы равномерно по длине машины.

Рис.13.6. Схема разгиба непрерывнолитой заготовки

На участке распрямления, кроме выполнения функции поддержания заготовки и ее вытягивания, на ролики добавляется функция правки заготовки. Известны различные схемы участков выпрямления: со стационарной установкой роликов, с плавающей кассетой поддерживающих роликов, с подпружиненными поддерживающими роликами, с балансирной установкой верхних роликов, с балансирной установкой четырех роликовых блоков и т.д. Обычно разгиб заготовки осуществляется в нескольких точках (например, 2-3 точки для сортовых МНЛЗ, 5-8 и более точек для слябовых МНЛЗ), что предотвращает появление внутренних поперечных трещин.

Между тем на практике существуют определенные рекомендации, основанные на экспериментальных данных, которые позволяют рассчитать шаг роликов, исходя из условия, что максимальный прогиб равен допустимому по условиям прочности и качества заготовки.

Рис.13.7. Общий вид секций ЗВО слябовой МНЛЗ

В настоящее время на современных слябовых и блюмовых МНЛЗ с целью подавления осевой пористости и ликвации широко используется метод «мягкого» обжатия. Этот метод предполагает обжатие заготовки в жидко-твердом состоянии. При этом фронты кристаллизации противоположных граней сближаются и выдавливают жидкую фазу в образовавшиеся в процессе кристаллизации усадочные полости, а также вверх заготовки. Как правило, величина обжатия, составляет несколько миллиметров по каждой стороне и выбирается из сообра-

жений обеспечения качества внутренних заготовки. Интенсивность обжатия лимитируется соображениями появления внутренних трещин, обусловленных крайне низкой пластичностью стали в области температур затвердевания. Обжатие осуществляется в той зоне заготовки, где доля жидкой фазы составляет 55-40% и менее. Для обеспечения эффективного «мягкого» обжатия в ЗВО предусматриваются специальные секции.

Рис.13.8. Принципиальная схема «мягкого» обжатия заготовки (слева) и общий вид секций ЗВО с «мягким» обжатием

0.16
0.16

ЛЕКЦИЯ №14

Зона вторичного охлаждения - 2: система охлаждения заготовки

Равномерное охлаждение непрерывнолитой заготовки является наиболее важной задачей, решаемой в зоне вторичного охлаждения. При этом заготовка, выходящая из кристаллизатора, имеет твердую корочку толщиной 15-35 мм, а также жидко-твердую зону и внутреннюю зону с жидкой фазой, имеющую температуру стали на уровне температуры ликвидус.

Отвод тепла от поверхности заготовки в ЗВО достигается путем интенсивного опрыскивания ее поверхности водой, отвода тепла к поддерживающим роликам с внутренним охлаждением и вследствие конвекции и лучеиспускания в окружающую среду.

Рис.14.1. Характер отвода тепла от заготовки во вторичной зоне охлаждения: 1 – вода, накапливающаяся между поверхностями роликов и заготовки; 2 – наиболее интенсивная зона теплоотвода в области прямого действия форсунки; 3 – зона минимального теплотвода (под роликом; 4 – твердая корочка

Известно, что доля суммарного теплоотвода в зоне вторичного охлаждения составляет 75-78%, причем 38-40% тепла передается подаваемой форсунками

воде, приблизительно 30% поддерживающим роликам с внутренним охлаждением и приблизительно 8% вследствие лучеиспускания и конвекции в окружающую среду.

Интенсивность охлаждения во вторичной зоне должна выбираться таким образом, чтобы температура поверхности заготовки в процессе ее перемещения по ней оставалась примерно постоянной или медленно уменьшалась. Достаточно часто предпочтение отдается варианту, при котором температура поверхности медленно снижается по всей длине ЗВО. Наиболее неблагоприятными условиями охлаждения являются колебания температуры заготовки в области температуры аустенитного превращения, поскольку они провоцируют возникновение горячих поверхностных трещин.

Плотность теплового потока (q), в ЗВО можно рассчитывать по следующей формуле: формуле, указанной ниже, она прямо пропорциональна.

$$q = \alpha\,(T_{пов} - T_{ос}) \qquad [14.1]$$

где α - коэффициенту теплопередачи;

$T_{пов}$ - температура поверхности заготовки;

$T_{ос}$ - температура охлаждающей среда.

По имеющимся данным о необходимой плотности теплового потока представляется возможным рассчитать требуемый расход охладителя (охлаждающей воды). Считается, что заготовка должна охлаждаться равномерно, а появление темных или ярких пятен на ее поверхности служит показателем неудовлетворительной работы форсунок или системы в целом.

Для обеспечения эффективного процесса охлаждения, величина коэффициента теплопередачи α должна быть достаточно высокой, однако она также должна быть регулируемой.

На приведенных ниже графиках (рис.14.2) в качестве иллюстрации показана форма расчетных кривых охлаждения заготовки (сляба). Так, для температуры поверхности заготовки в кристаллизаторе наблюдается резкое падение (до 1250°С), а затем более плавное ее снижение (приблизительно до 1100°С на вы-

ходе). Для кривых, показывающих температуру в центре широкой грани и в угловой точке в области вторичного охлаждения наблюдаются характерые выступы, соответствующие отдельным форсункам. При этом интенсивное снижение температуры происходит на протяжении первых пяти зон (от 0.9 до 8 м), затем значение температуры колеблется в районе 960°С .

Рис.14.2 Графики распределения температуры поверхности и теплового потока по высоте заготовки

Температура поверхности непрерывнолитой заготовки в ЗВО устанавливается таким образом, что тепловой поток через корку слитка и теплоотвод на поверхности слитка получались примерно одинаковыми. Повышение интенсивности теплоотвода ограничивается конечным термическим сопротивлением корки заготовки. Оптимальная температура поверхности при этом составляет 1100-1200^{0}С. Выбор рационального уровня температур заготовки (и интенсивности охлаждения) в ЗВО зависит от ряда факторов, включающих марку стали, метод охлаждения, тип МНЛЗ и пр.

Длина ЗВО выбирается из соображений того, что в случае его прекращения температура поверхности не будет уже затем существенно увеличиваться. Удлинение ЗВО особенно при больших скоростях разливки, наоборот, может обеспечить более высокий теплоотвод и весьма часто также требуется для поддерживания заданных температур поверхности в нижней части машины.

Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО предусматривается несколько секций с различной интенсивностью отвода тепла. Для достижения требуемой интенсивности теплоотвода применяются следующие основные методы подачи охлаждающего вещества: охлаждение струями воды (струйное охлаждение) или водовоздушной смеси (водовоздушное охлажденире), подаваемой между опорными роликами через специально устанавливаемые форсунки; охлаждение на воздухе посредством излучения.

При этом температурное состояние непрерывнолитой заготовки может достаточно полно быть оценено на математических теплофизических моделях. На рис.14.3 представлена картина охлаждения сляба после замены промковша.

Рис.14.3. Состояние поверхности (слева) и внутренних продольных сечение по широкой (середина) и узкой (справа) граням

Струйное охлаждение обеспечивает вторичное охлаждение заготовки струями воды, которые подаются через специальные разбрызгивающие форсунки, которые, например, на слябовых машинах имеют щелевые формы. Вода попадает на поверхность заготовки в виде капель, которые должны иметь достаточную энергию, чтобы проникнуть сквозь паровую «рубашку», образовавшую-

ся вследствие испарения воды. Этот способ охлаждения имеет ряд существенных недостатков: величина теплоотдачи не всегда увеличивается пропорционально увеличению расхода воды; капли из водяной форсунки обычно достаточно крупные, что не способствует увеличению скорости парообразования и ограничивает эффективность охлаждения; в месте воздействия водяной струи происходит термический удар, который может привести к зональной сегрегации или образованию трещин и т.д.

Обычно струйное охлаждение применяется в зоне, непосредственно расположенной под кристаллизатором, а также в следующей после этого зоне (зоны 0 и 1). В зоне подбоя (зона 0) форсунки расположены таким образом, что струи направлены под углом к днищу кристаллизатора. При этом вода не попадает в проем кристаллизатора, а направляется на опорные ролики, обеспечивая этим дополнительное их охлаждение. В зонах 1 и 2 форсунки располагаются аналогичным образом, то есть часть струи омывает ролики при любых расходах воды, дополнительно их охлаждая.

Рис.14.4. Зоны 0 и 1 для слябовой МНЛЗ (расположение форсунок)

Для слябовых МНЛЗ устанавливаются несколько форсунок в растворе роликов. При этом необходимо определить участки перекрытия струй, что

позволяет обеспечить равномерное распределение воды по всей ширине охлаждения. При этом определенные технические затруднения вызывает расположение форсунок в ЗВО слябовых МНЛЗ, которые имеют возможность изменения ширины сляба в процессе разливки.

Между тем система струйного охлаждения является достаточно простой в конструкционном плане, что позволяет ее широко использовать в блюмовых и особенно сортовых сортовых МНЛЗ.

Рис.14.5. Фотография факела распыляемой воды форсунки струйного распыления (слева) и схема расположения форсунки относительно поверхности сортовой заготовки

Водовоздушное охлаждение осуществляется частицами воды, которые распыляются воздухом. Распыление воды происходит в основном в результате соударения двух потоков (водяного и воздушного) внутри форсунки. Распылитель представляет собой как бы две независимые форсунки – для воды и для воздуха,- струи от которых пересекаются. Оба потока выходят из распылителя в направлении непрерывнолитой заготовки и встречаются один с другим, образуя факел мелкодисперсных капель воды. дух при этом способе охлаждения играет двоякую роль: он обеспечивает распыление воды и сообщает каплям необходимую высокую кинетическую энергию. Характер распыления воды определяется расходом и давлением воздуха и поддается регулированию в широком диапазоне параметров.

Высокая эффективность метода водовоздушного охлаждения объясняется

тем, что благодаря высокой кинетической энергии с металлом одновременно контактирует большое количество распыленной воды. При одном и том же расходе воды площадь теплообмена между водой и заготовкой увеличивается: с одной стороны, вода мелко распылена и число капель очень велико, а с другой, - эти капли равномерно распределяются по поверхности заготовки, так как факел имеет устойчивую форму конуса. Вода, которая не испарилась при контакте с поверхностью заготовки, падает вниз в виде мелкого дождя, создавая зону охлаждения ближайших участков.

Основные преимущества системы водовоздушного охлаждения заключаются в следующем:

-высокие скорости движения потоков непосредственно в отверстии форсунки, что существенно уменьшает вероятность зарастания отверстия;

-возможность формирования капель воды оптимальных размеров, что повышает эффективность охлаждения в целом;

-широкий диапазон изменения параметров подачи охлаждающей жидкости и воздуха, что позволяет использовать один типоразмер форсунок для различных марок сталей и скоростей литья;

-однородность распыления воды вдоль поверхности широких граней слябов за счет использования нескольких форсунок по ширине (с перекрытием), что снижает вероятность локального переохлаждения (перегрева) поверхности слитка.

Бесперебойная работа систем форсуночного охлаждения во многом зависит от качества используемой воды. Грязная и слишком жесткая вода приводят к засорению форсунок. Засорение форсунок приводит неравномерному разбрызгиванию охлаждающей жидкости и соответственно к неравномерному охлаждению

непрерывнолитой заготовки. Это, как известно, приводит к короблению твердой корочки заготовки, растрескиванию или к прорывам.

Рис.14.6. Фотография сортовых заготовок в ЗВО (слева) и слябовой заготовки (неравномерное охлаждение) на выходе из ЗВО

В настоящее время для обеспечения МНЛЗ водой надлежащих кондиций (давление 0,5-0,6 Мпа, расход до 200-220 $м^3$/час, температура на входе – макс. 35°С, температура на выходе - макс. 45°С) предусматриваются специальные станции ее очистки. По ряду показателей такая вода превосходит качество питьевой воды.

Параметры	Ед. измерения	Питьевая вода	Техническая вода, используемая для охлаждения на МНЛЗ
Значение pH		7,0	7,0-7,5
Мутность		0,1-5,0	-
Общая жесткость	мл.гр - экв/л	4,5-4,6	1,0-1,4
Щелочность	мл.гр - экв/л	3,8	0,7-1,0
Хлориды	мл.гр - экв/л	3,5-18	6,0-12,7
Сульфаты	мл.гр - экв/л	8,9-44	11,4-16
Общее содержание железа	мл.гр - экв/л	0,3-0,9	0,8-1,3
Сухой остаток	мл.гр/л	150	90-110
Взвешенные вещества	мл.гр/л	1,4	5,0-7,0

Рис.14.7. Элементы системы подготовки и подачи воды на МНЛЗ

Схема распределения охлаждающей воды по ширине сляба

Зона вторичного охлаждения под кристаллизатором сортовой МНЛЗ

ЛЕКЦИЯ №15

Участок тянуще-правильной клети и порезки заготовки

Равномерность вытягивания непрерывнолитой заготовки является необходимым условием стабильности технологического процесса разливки. Скорость вытягивания заготовки регулируется специальным устройством – тянущей клетью, которая располагается в той зоне, где заготовка уже практически полностью затвердела после правильного участка. Поступающая в тянуще-правильную заготовка всегда является полностью затвердевшей. Кроме того, допуск по толщине заготовки должен поддерживаться минимальным.

Тянущая клеть выполняется в виде отдельной секции, состоящей из нескольких приводных верхних и нижних роликов. В радиальных и криволинейных МНЛЗ тянущая клеть функционально совмещается с участком разгиба заготовки, состоящем из одной-двух секций. При этом первая секция по ходу заготовки предназначена для многоточечного распрямления заготовки.

Рис.15.1. Слябовая заготовка в тянуще-правильной клети

Распрямление заготовки представляет собой процесс деформации заготовки в каждой роликовой паре с переходом на меньший радиус кривизны заготов-

ки. Фактически в процессе такого разгиба поверхностные и подповерхностные слои заготовки по малому радиусу испытывают растягивающие напряжения, а по большому радиусу – напряжения сжатия.

Пластичность стали в диапазоне температур 1300-1400 ^{o}C значительно ниже 1%. Поэтому участок распрямления заготовки должен быть построен по кривой с постоянно увеличивающимся радиусом кривизны от величины базового радиуса при переходе с дугового участка на участок разгиба до бесконечности в конце разгиба при переходе с криволинейного участка на горизонтальный. Диаметр и шаг роликов рассчитывается в соответствии с возникающими тянущими усилиями и усилием правки, а также допустимыми изгибающими усилиями, действующими на ролики, которые появляются вследствие прижимания роликов к поверхности заготовки.

На практике в зависимости от требований к качеству внутренних объемов заготовки разгиб осуществляется в 2-3 точках для сортовых МНЛЗ и в 5-12 точках для слябовых и блюмовых МНЛЗ. Схему разгиба выбирают в зависимости от требований к качеству заготовки, а так же скорости разливки и геометрической формы заготовки.

На выходе из МНЛЗ (после тянуще-правильной клети) заготовка разделяется на мерные длины. Процесс порезки заготовки осуществляется без остановки ее движения, что требует согласования скоростей движения заготовки и режущего устройства. Устройства для порезки заготовок являются важным функциональным узлом МНЛЗ. Для обеспечения стабильной работы МНЛЗ они должны иметь высокую степень надежности в эксплуатации.

На практике основным методом порезки заготовки является *газовая резка*, которая реализуется с помощью специальных машин. При газовой резке большая часть необходимой энергии образуется в результате сгорания стали. Газовая резка практически не имеет альтернативы особенно для заготовок больших сечений. При этом резак должен выполнить полный рез за время, которое меньше, чем время, за которое заготовка продвинется на мерную длину.

Современный резак для слябовой заготовки, например, обеспечивает скорость резания 250-500 мм/мин в зависимости от марки стали и толщины заготовки со средней шириной реза 8-10 мм. Для широких слябов предусматриваются два резака, двигающиеся на встречу друг другу.

Для получения прямолинейного реза необходимо обеспечить синхронизацию движения слитка и резака. Это достигается сцеплением резака со слитком при помощи пневматических или гидравлических захватов, а также с применением специальных приводов перемещения оборудования резака.

Основными преимущества газовой резки являются сравнительная компактность машин газовой резки, низкая стоимость оборудования, а также сохранение требуемой геометрической формы торцом заготовки после порезки. Последнее преимущество представляется крайне важным в том случае когда заготовка является товарной продукцией.

Рис.15.2. Газовая порезка слябовой (слева) и сортовой (справа) заготовки

Недостатки газовой резки также весьма очевидны:

-существенные потери (до 1%) металла в процессе резки и необходимость уборки шламов (продуктов порезки);

-наличие на кромке остатков шламов, которые необходимо убирать до начала прокатки;

-работа машин сопровождается шумом и выделением большого количества газов;

-отсутствие деформаций профиля заготовки в поперечном сесении в месте порезки;

-порезка легированных и нержавеющих сталей требует дополнительных мероприятий по организации процесса резки.

Рис.15.3. Сечение блюмовой заготовки в месте газовой порезки

Другим методом разделения непрерывнолитой заготовки на мерные длины является порезка с помощью *механических гидравлических ножниц*. Они не издают дополнительного шума, обеспечивают высокую скорость порезки, не требуют специальных устройств для уборки шлама и оказываются пригодными для резки заготовок любых марок стали и габаритов. Однако порезка заготовки с помощью гидравлических ножниц имеет два существенных недостатка, которые ограничивают область их применения. Во-первых, порезка с помощью гидравлических ножниц приводит к деформированию профиля конца заготовки (100-150 мм от торца), что ухудшает ее товарный вид. Во-вторых, удар, происходящий во время реза, приводит к дополнительным колебаниям уровня металла в кристаллизации и может приводить к сбоям в работе автоматики.

Рис.15.4. Торцы сортовой заготовки при огневой порезке (слева) и при порезке на гидравлических ножницах

После порезки непрерывнолитые заготовки передаются на холодильник, где они продолжают охлаждаться на воздухе (рис.15.5).

Рис.15.5. Передача сортовой заготовки на холодильник

После охлаждения заготовок до температуры, обеспечивающей достаточную прочность для транспортировки крановым оборудованием, заготовки передаются на склад готовой продукции.

Рис.15.6. Транспортировка сляб на склад

ЛЕКЦИЯ №16

Основные сведения о процессах затвердевания непрерывнолитых заготовок

Непрерывно возрастающая конкуренция на мировом рынке предъявляет все более жесткие и комплексные требования к качеству непрерывнолитой заготовки, которые необходимо обеспечивать на всех стадиях технологической цепочки выплавки, внепечной обработки и разливки стали.

Важным этапом в получении качественных непрерывнолитых заготовок является процесс перехода стали из жидкого состояния в твердое, называемый затвердеванием. Затвердевание заготовки происходит в течение 10-20 минут и сопровождается сложными физико-химическими процессами, включающими явления массопереноса, изменения химического состава стали, уменьшения ее объема и пр.

Процессы тепло- и массопереноса, а также упругопластической деформации, происходящие при затвердевании непрерывнолитой заготовки, сопровождаются конвективным движением потоков металла, формированием кристаллической структуры, развитием усадочных и ликвационных явлений, которые существенным образом предопределяют формирование конечной внутренней структуры непрерывнолитой заготовки.

Заливка металла в кристаллизатор сопровождается турбулентным перемещением больших объемов жидкой стали, которое оказывает существенное влияние на процессы массо- и теплопереноса.

Теплопередача от движущихся потоков жидкой перегретой стали к границе затвердевания может происходить или под действием внешних сил, или благодаря разности плотностей жидкого металла, вызванной местным охлаждением в поле действия сил тяжести. В первом случае происходит теплообмен в условиях вынужденной конвекции, а во втором имеет место свободная конвекция. В процессе конвекции объемы среды стремятся переместиться к поверхности теплообмена и отдают ей тепло тем интенсивнее, чем больше скорость движения сре-

ды. Поэтому конвекция неразрывно связана с турбулентностью, а ее интенсивность определяется, прежде всего, интенсивностью потока теплоносителя.

На начальном этапе процесса затердевания непрерывнолитой заготовки происходит охлаждение жидкой стали до температуры начала затвердевания (температура ликвидус), а также появление зародышей твердой фазы в зонах интенсивного отвода тепла. Температура ликвидус может быть определена по формуле, приведенной в лекции №9.

В отличие от чистых металлов при кристаллизации многокомпонентных расплавов, к которым относятся промышленные стали, возникает так называемое концентрационное (диффузионное) переохлаждение. Возникновение последнего связано с ликвацией компонентов расплава. *Ликвацией* в данном случае называют различие химического состава твердой и жидкой фаз, возникающее при кристаллизации. Наибольшее влияние на развитие ликвационных явлений оказывают такие химические элементы как сера, углерод, фосфор, кремний, марганец, молибден, хром и пр. Если жидкость обогащается примесным элементом, ликвацию считают положительной, а если обедняется – отрицательной. Различия в химическом составе различных объемов металла возникшие в результате ликвации сохраняются в стали после завершения затвердевания.

Перемещение металла, обогащенного ликвационными примесями, из области затвердевания, в которой сосуществует твердая и жидкая фазы, в жидкую область слитка определяется, во-первых, механическим захватом жидкости осями растущих дендритов (зона столбчатых кристаллов) и ее вытеснением, во-вторых, диффузией (молекулярной и конвективной), осуществляющей перенос загрязненной жидкости. Оба эти фактора действуют независимо от природы ликвирующих примесей.

Форма растущих в расплаве кристаллов зависит от переохлаждения жидкости, направления теплоотвода, содержания примесей в стали и других параметров. В несколько упрощенном варианте для стальных заготовок можно ограничиться тремя характерными кристаллическими зонами (рис. 16.1):

- корковая зона толщиной в несколько миллиметров, состоящая из мелких кристалликов близких к равноосным, оси первого порядка которых располагаются преимущественно перпендикулярно к поверхности слитка;
- зона столбчатых (дендритных) кристаллов, оси первого порядка которых четко направлены перпендикулярно к поверхности слитка (в случае заливки сильно перегретой стали столбчатые кристаллы достигают оси слитка и такое явление называется транскристаллизацией);
- зона неориентированных кристаллов, занимающая всю среднюю часть слитка и состоящая из крупных кристаллов с беспорядочным направлением осей первого порядка.

а *б* *в*

Рис.16.1. Основные структурные зоны непрерывнолитых заготовок, образующиеся при затвердевании: *а* - структура равноосных кристаллов; *б* – структура столбчатых кристаллов; *в* – равноосная «недендритная» структура

Формирование корковой зоны и столбчатых кристаллов происходит в условиях некоторого перегрева металла в жидкой сердцевине слитка (то есть при условии, когда температура стали превышает значение температуры ликвидус) и наличия достаточно сильных конвективных потоков. После снятия перегрева металла происходит интенсивное формирование двухфазной зоны.

В строении дендрита выделяются главные оси первого порядка, перекрещивающиеся с ними оси второго порядка и иногда оси третьего порядка. Границы между дендритами выявляются менее отчетливо, чем между округлыми зер-

нами; скорее, они представляют собой сцепления между окончаниями осей дендритов второго порядка (рис. 16.2).

Рост дендрита, образующегося на холодной поверхности и выступающего в расплав перпендикулярно к поверхности кристаллизатора, характеризуется различной скоростью продвижения отдельных плоскостей кристаллов, а свою форму сохраняют только более медленно растущие плоскости, в то время как более быстро растущие поверхности образуют шип, выступающий в оставшийся расплав. Выделяющаяся в переохлажденный расплав теплота кристаллизации растущего рассмотренным способом кристалла ухудшает условия роста других близлежащих кристаллов.

Рис.16.2. Фотографии дендритов полученных на модельных сплавах

Первоначально дендриты очень малы, даже если затвердевание идет сравнительно медленно. Затем, когда процесс затвердевания замедляется, рост продолжают лишь отдельные ветви, оси которых совпадают с направлением теплового потока (рис.16.3).

Рис.16.3. Схематическое представление этапов укрупнения ветвей дендритов в процессе их роста

Другие ветви при этом частично растворяются таким образом, что протяженность дендритов значительно увеличивается по мере затвердевания. Окончательная длина дендритов определяется процессом их укрупнения и может составлять величину от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

Образование дендритной структуры металла в процессе кристаллизации заготовки связано с особенностью ее формирования при затвердевании металла в зоне двухфазного состояния. Наличие переохлажденного расплава перед фронтом затвердевания приводит к тому, что вначале в переохлажденном слое быстро растет “скелет” дендрита, т. е. сравнительно тонкая ось дендрита первого порядка. Затем уже происходит утолщение дендритных ветвей. Обе стадии формирования дендритного остова протекают в различных условиях и с разной скоростью.

Захваченные фронтом кристаллизации дендриты фиксируются под определенным углом к омывающему их конвективному потоку. С увеличением скорости конвективного потока и понижением скорости затвердевания угол отклонения главной оси дендрита увеличивается. При достаточно интенсивных конвективных потоках (например, электромагнитное перемешивание) происходит подплавление осей и механическое обламывание ветвей дендритов. Отделившиеся частицы дендритов образуют жидко-твердую область, служат самостоятельными зародышами кристаллизации или расплавляются.

Рост кристаллов столбчатой зоны сопровождается также снятием термического переохлаждения выделяющейся теплотой кристаллизации и повышением концентрации легкоплавких растворимых примесей перед фронтом кристаллизации, что приводит к возникновению концентрационного переохлаждения.

Считается, что только часть жидкой фазы может затвердеть по дендритной схеме, а остальной объём жидкости затвердевает вследствие отвода тепла из кристаллизующегося металла в результате теплопроводности. Затвердевание этого расплава происходит из-за перемещения недендритной поверхности разде-

ла фаз через уже образовавшийся дендритный остов. Эта стадия заполнения междендритного пространства твердой фазой протекает гораздо медленнее, чем дендритный рост.

Переход от зоны столбчатых кристаллов к неориентированным связан с величиной температурного градиента в жидкой части слитка у фронта затвердевания. Указанный переход происходит при достижении этим градиентом некоторого минимального значения. При увеличении скорости охлаждения толщина зоны столбчатых кристаллов возрастает.

Характер развития зоны равноосных дендритов во многом зависит как от химического состава металла, так и от степени его перегрева над температурой ликвидус. При этом затвердевание в зоне равноосных дендритов происходит по механизму гетерогенного зарождения центров кристаллизации или по механизму дендритной мультипликации (умножения числа зародышей за счет разрушения ветвей дендритов).

Характер расположения зон столбчатых и неориентированных (равноосных) кристаллов представлен на рисунке 16.4.

Рис.16.4. Расположение зон столбчатых и неориентированных (равноосных) кристаллов в поперечном сечении круглого латунного непрерывнолитого слитка

На завершающем этапе затвердевания заготовки происходит формирование химической неоднородности, которая проявляется в виде повышенной концентрации некоторых химических элементов в определенных локализованных зонах заготовки на макро- и микроуровнях. Это обычно связывается с развитием явления ликвации.

На практике различают дендритную неоднородность в пределах одного дендрита (микроуровень) и зональную неоднородность в пределах заготовки (макроуровень). Внутри дендрита наблюдают различный химический состав сплава в осях, в межосных пространствах и по его границам. Развитие процесса макроликвации зависит от химического состава стали и от геометрических размеров заготовки: чем больше сечение, тем выше степень ликвации.

Наиболее опасной является *осевая ликвация*. Непосредственной причиной формирования осевой ликвации (рис 16.5) в центральной части слитков являются усадочные перемещения жидкой и твердой фазы.

Рис.16.5. Кристаллическая структура и осевая пористость в продольном сечении стальной сортовой заготовки сечением 150х150 мм

Процесс образования осевой неоднородности реализуется на границе твердой и жидкой частей слитка в условиях, когда уровень жидкости в средней его части непрерывно опускается. По мере сближения фронтов горизонтального затвердевания у оси заготовки усадочное перемещение возрастает. Поток движущегося жидкого металла увлекает за собой скопления ликватов, экстрагируя их из межосных пространств дендритов. Скопления ликвата описывают траектории, определяемые, с одной стороны, движением границ затвердевания, а с другой — усадочными перемещениями жидкого металла. Известно, что при содержании в двухфазной жидко-твердой области около 20% твердой фазы вязкость ее возрастает, что приводит к потере жидкотекучести и питание усадки жидким металлом из верхних горизонтов затрудняется. Именно поэтому осевая неоднородность характеризуется пористостью, проявляющейся в виде трещин.

Ликвация в осевой зоне заготовки (рис 16.6) крайне опасна, так как подобные пороки устраняются с трудом. Это обусловлено, прежде всего, снижением эффективности прокатки (проработки металла) по мере приближения к центру заготовки. Особую опасность осевая пористость представляет для крупных сечений непрерывнолитых заготовок (например, блюмов и толстых слябов).

Фиг.16.6. Серный отпечаток продольного сечения блюмовой заготовки с осевой ликвацией

В процессе затвердевания и охлаждения заготовки протекают процессы усадки металла. Сущность усадки состоит в объемных изменениях жидкой и

твердой фаз при понижении температуры и объемных изменениях, происходящих при фазовых превращениях. Эти процессы проявляются в заготовке характерными изменениями, в результате которых уменьшаются ее общие размеры, а внутри заготовки образуются усадочные пустоты (усадочные раковины, усадочная пористость), усадочные деформации (линейная усадка, коробление), трещины, остаточные внутренние напряжения и т.п.

Численные характеристики изменений размеров тел при охлаждении называют *коэффициентами усадки,* которые могут выражаться в объемных или линейных величинах, в долях единицы или в процентах. Величина объемной усадки стали при затвердевании обусловливается величиной интервала кристаллизации, который, в частности, определяется содержанием углерода и других элементов. Она может составлять 3-5%.

Рис.16.7. Кристаллическая структура блюмовой заготовки из нержавеющей стали

Контрольные вопросы.

Что представляет собой процесс затвердевания стали?

Что такое затвердевание стали?

Какие процессы и явления предопределяют формирование конечной внутренней структуры непрерывнолитой заготовки?

Что такое ликвация примесей?

Какие химические элементы способствуют развитию ликвационных явлений?

Чем характеризуется отрицательная и положительная ликвация?

От чего зависит форма растущих в расплаве кристаллов?

Что такое транскристаллизация?

Охарактеризуйте особенности строения дендрита.

От чего зависит угол отклонения главной оси дендрита?

С чем связан переход от зоны столбчатых кристаллов в структуре непрерывнолитой заготовки к неориентированным?

От чего зависит толщина зоны столбчатых кристаллов?

От чего зависит характер развития зоны равноосных дендритов?

Что такое химическая неоднородность непрерывнолитой заготовки и чем она обусловлена?

Охарактеризуйте физический смысл процесса образования осевой неоднородности?

Охарактеризуйте сущность усадочных явлений имеющих место при кристаллизации слитка.

Что такое усадочный коэффициент?

ЛЕКЦИЯ №17.
Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке стали

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкой стали является одним из эффективных методов повышения качества непрерывнолитой заготовки. Механизм электромагнитного воздействия является результатом сложного взаимодействия электродинамических, магнитогидродинамических и металлургических факторов. ЭМП улучшает качество подповерхностной и осевой зоны непрерывнолитых заготовок, так как оно воздействует на формирование кристаллической структуры, перемещение неметаллических включений, химическую сегрегацию и распределение газов.

Индуктивная система ЭМП представляет собой статор асинхронного двигателя, ротором которого является жидкая лунка непрерывного слитка. На практике используются статоры с вращающимися и линейными полями (рис. 17.1).

а *б* *в*

Рис.17.1. Схемы наложения электромагнитного перемешивания с вращающимся (а) и линейным полем (б) для сортовой заготовки и линейным полем для сляба (в)

Основные электрические параметры устройств ЭМП меняются в широких пределах в зависимости от их конструкции и сечения заготовки. Характер потоков, создаваемых ЭМП, зависит от конкретных условий (сечение заготовки, место приложения воздействия, требования к результатам воздейст-

вия и т.п.). Магнитодинамические потоки, создаваемые ЭМП, состоят из одного или нескольких замкнутых контуров.

Наиболее характерной особенностью распределения полей скоростей конвективных потоков при электромагнитном перемешивании является их максимальное значение непосредственно у источника воздействия с последующим уменьшением интенсивности перемешивания по мере приближения к оси заготовки. Максимальная скорость принудительных потоков при электромагнитном перемешивании регулируется посредством напряженности электромагнитного поля и может достигать значений нескольких метров в секунду. При этом в зависимости от условий воздействия в жидкой фазе могут формироваться ламинарные течения, турбулентные потоки и вихревые зоны.

С точки зрения глубины проникновения электромагнитного поля, влияние индукторов перемешивающих устройств на кристаллизующийся слиток можно разделить на следующие группы:

– для обработки поверхностных и подповерхностных слоев непрерывной заготовки;

– для уплотнения внутренних объемов.

В первом случае применяют вертикальное перемешивание металла в кристаллизаторе, а во втором проводят вращательное перемешивание расплава в горизонтальной плоскости.

По совокупности получаемых эффектов и специфике используемых приемов воздействия на всей протяженности технологической длины непрерывнолитой заготовки можно условно выделить следующие наиболее характерные зоны (рис.17.2):

Рис.17.2. Схематическое представление возможных точек приложения электромагнитного перемешивания: MEMS – кристаллизатор; SEMS – зона вторичного охлаждения заготовки; FEMS – зумпфовая зона

- зона кристаллизатора (*MEMS – mold electromagnetic stirrer*) или непосредственно расположенная под кристаллизатором;
- зона вторичного охлаждения (*SEMS – strand electromagnetic stirrer*), удаленная от нижнего торца кристаллизатора на расстояние нескольких метров (то есть зона формирования столбчатых кристаллов);
- зона объемной кристаллизации или зумпфовая зона (*FEMS – final electromagnetic stirrer*).

Основной эффект ЭМП *в кристаллизаторе* (рис 17.3, 17.4) следует связывать с изменением гидродинамической обстановки в жидкой ванне кристаллизатора под влиянием принудительных конвективных потоков. Как правило, в этой части МНЛЗ применяют устройства, которые обеспечивают формирование восходящих потоков вдоль фронта затвердевания или вращение стали в горизонтальной плоскости.

Вращающееся магнитное поле в кристаллизаторе при отливке сортовых заготовок открытой струей создает глубокий мениск металла, на дне которого сосредотачиваются неметаллические включения, вращающиеся с меньшей скоростью, чем жидкая сталь. В результате этого эффекта концентрация неметаллических включений в твердой оболочке слитка существенно снижается.

Рис.17.3. Схема кристаллизатора сортовой МНЛЗ с устройствами для ЭМП

Рис.17.4. Фотография кристаллизатора слябовой МНЛЗ с устройствами для ЭМП

В целом положительный эффект ЭМП на процессы формирования непрерывнолитой заготовки посредством принудительных восходящих вдоль фронта затвердевания конвективных потоков следует связывать со следующими явлениями:

- улучшение условий выноса из металла газовых пузырьков, макро- и микронеметаллических включений вследствие их «запутывания в растущих дендритах;

- подавление негативных явлений, связанных с внедрением в жидкую ванну струи металла за счет изменения характера движения потоков металла в кристаллизаторе (электромагнитное торможение);
- улучшение условий теплопередачи от «горячей» жидкой сердцевины к границе раздела фаз (в том числе и усреднение жидкой ванны металла по температуре);
- подавление волновых процессов, развивающихся на поверхности металла в кристаллизаторе из-за динамических воздействий, связанных с движением струи металла.

В конечном счете, вышеперечисленные положительные эффекты обеспечивают повышение качества поверхности и корковой зоны непрерывнолитой заготовки, предотвращая при этом возможный прорыв металла под кристаллизатором. При расположении электромагнитного индуктора под кристаллизатором в большинстве случаев положительное влияние на качество заготовки несколько уменьшается.

Наиболее существенными негативными проявлениями, сопровождающими наложение электромагнитного воздействия в кристаллизаторе, принято считать:

- образование полос отрицательной ликвации («белых» полос на серном отпечатке), которые уменьшают химическую однородность заготовки и могут приводить к повышенному образованию трещин при прокатке;
- увеличение износа погружных стаканов, находящихся в зоне влияния электромагнитного перемешивания.

Расположение *электромагнитного индуктора в ЗВО* имеет своей целью обеспечение улучшения качества непрерывнолитой заготовки в зоне столбчатых (дендритных) кристаллов за счет их измельчения и уплотнения. Помимо этого, наличие восходящих конвективных потоков обеспечивает определенное повышение чистоты металла в этой зоне. Наложение ЭМП в зоне формирования столбчатых кристаллов может препятствовать формированию различного рода перемычек между противоположными фронтами затверде-

вания, что, в конечном счете, обеспечивает значительное подавление дефектов усадочного (пористость) и ликвационного характера.

При электромагнитном перемешивании (особенно в турбулентном режиме) условия формирования дендритов, как это видно из рис.17.5 *а*, могут существенно изменяться.

Это, в первую очередь, будет относиться к тем дендритам, которые выступают за фронт затвердевания в жидкую фазу. Соответственно, при такой обработке линия фронта затвердевания будет выравниваться, а формирующаяся кристаллическая структура – уплотняться.

При этом существует высокая вероятность того, что под воздействием динамических нагрузок часть вершин дендритов будет механически обламываться (рис.17.5 *а*) и осколки твердой фазы попадут в жидкую ванну, где будут постепенно оседать в зумпфовую зону. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов, в свою очередь, при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов (рис.17.5 *б*).

а ***б***

Рис.17.5. Схематическое представление механизма воздействия электромагнитного перемешивания в зоне столбчатых кристаллов (*а*) и характера перехода зоны столбчатых кристаллов в равноосную зону после окончания воздействия (*б*)

Измельчение столбчатых кристаллов при электромагнитном перемешивании достигается в достаточно широком диапазоне интенсивности воздействия (при создании вертикальных восходящих потоков). Однако этот эф-

фект сопровождается, как правило, образованием полосы «белой» (по серному отпечатку) ликвации, которая при увеличении интенсивности воздействия проявляется все более ярко.

С другой стороны, эффект ЭМП оказывает влияние на формирование заготовки в достаточно малом (по сравнению с общим временем затвердевания) временном интервале. Поэтому при выходе из зоны действия электромагнитного перемешивания оказывается вполне вероятным восстановление нормальных закономерностей роста зоны столбчатых кристаллов, что снижает однородность кристаллической структуры.

Использование ЭМП в зумпфовой зоне (то есть в зоне объемной кристаллизации) направлено на улучшения качества непрерывнолитой заготовки путем подавления дефектов осевой зоны ликвационного и усадочного характера (рис.17.6).

Рис.17.6. Схематическое представление характера развития усадочных и ликвационных дефектов в непрерывнолитой заготовке (*а* – высокая температура разливки, низкое содержание углерода, сечение заготовки – квадрат 80 мм; *б* - высокая температура разливки, высокое содержание углерода, сечение заготовки – квадрат 80 мм; *в* - высокая температура разливки, высокое содержание углерода, сечение заготовки – квадрат 250 мм; *г* - высокая температура разливки, высокое содержание углерода, сечение заготовки – 330х450 мм)

Выбирая режимы электромагнитного перемешивания для обработки зумпфовой зоны, следует в максимальной степени учитывать условия формирования твердой фазы заготовки. По существу в этой зоне происходит

объемная кристаллизация на базе частиц твердой фазы, находящихся в расплаве.

Как правило, такая кристаллизация сопровождается появлением твердого каркаса, который по мере его роста становится все более прочным и его составляющие ветви препятствуют подпитке жидкостью донных объемов жидко-твердой ванны, что способствует развитию осевой пористости. Соответственно, для улучшения условий затвердевания последних (донных) объемов непрерывнолитой заготовки представляется целесообразным принудительное разрушение формирующегося каркаса, которое оказывается возможным при возбуждении конвективных потоков.

Наиболее рациональным технологическим приемом является формирование принудительных циркуляционных потоков, которые располагались бы в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, так как в этом случае обеспечивается интенсивное перемешивание металла во всем сечении. Создание же принудительных потоков, движущихся вдоль фронта затвердевания не может обеспечить повышения качества заготовки, так как зумпфовая зона обогащена ликватами и, следовательно, движение металла вдоль фронта затвердевания будет способствовать развитию дополнительных ликвационных полос положительной ликвации (типа V – образной ликвации).

Рациональный выбор места и интенсивности приложения электромагнитного воздействия обеспечивает существенное уменьшение протяженности жидкой лунки и, соответственно, уменьшение количества макродефектов типа усадочная пористость при измельчении зерна кристаллической структуры. При этом, как правило, несколько уменьшаются осевые пористость и ликвация. Однако в полной мере эти дефекты не подавляются при наложении ЭМП.

Положительное влияние ЭМП на снижение уровня пораженности непрерывнолитого слитка различного рода дефектами иллюстрируется данными таблицы 17.1.

Таблица 17.1 – Влияние ЭМП на дефекты непрерывнолитой заготовки

Тип дефекта	**Место наложения ЭМП (●** снижение дефектообразования**)**		
	Перемешивание в кристаллизаторе (MEMS)	**Перемешивание в ЗВО (SEMS)**	**Перемешивание в зумпфовой зоне (FEMS)**
Шлаковые включения на поверхности	●		
Газовые пузырьки	●		
Газовая пористость	●		
Подповерхностные шлаковые включения	●		
Прорывы металла	●		
Искажение профиля заготовки	●		
Внутренние трещины	●	●	
Уменьшение протяженности зоны столбчатых кристаллов	●	●	
Осевая ликвация	●	●	●
Осевая пористость	●	●	●
V-образная ликвация			●

В целом достижение широкого спектра положительных качественных эффектов при использовании электромагнитного перемешивания в каком-либо отдельном месте по технологической длине заготовки оказывается недостаточным. Поэтому на практике широко используется система нескольких электромагнитных индукторов (мультиэлектромагнитное перемешивание), расположенных вдоль технологической оси заготовки.

Преимуществами мультиэлектромагнитного воздействия являются более равномерный подвод внешней энергии к жидкой фазе, уменьшение интенсивности воздействия в каждом месте его приложения (снижение вероятности появления «белых» ликвационных полос) и т.п. Основным же недостатком этой системы является резкое возрастание расходов на обработку.

Таким образом, применение электромагнитного перемешивания позволяет корректировать негативные эффекты, которые обычно связываются с перегревом стали в промковше и колебаниями скорости разливки металла,

что повышает стабильность работы МНЛЗ и расширяет возможности автоматизации процесса разливки. Вместе с тем, учитывая достаточно высокие затраты на оборудование для электромагнитного перемешивания, представляется целесообразным его использование в первую очередь для средне- и высокоуглеродистых (в том числе легированных) сталей, к качеству заготовки из которых предъявляются высокие требования.

A. 凝固末端电磁搅拌器

A Final electromagnetic stirrer (FEMS)

Контрольные вопросы.

В чем заключается механизм воздействия ЭМП на кристаллизующийся слиток?

Как ЭМП влияет на качество непрерывнолитого слитка?

Охарактеризуйте индуктивную систему ЭМП.

От чего зависит характер потоков, создаваемых ЭМП?

Какие зоны непрерывнолитой заготовки наиболее часто подвергаются ЭМП?

Чем обусловлен основной эффект ЭМП в кристаллизаторе?

В чем заключается положительное и негативное влияние ЭМП на качество стали и ход технологического процесса непрерывной разливки?

Основная цель ЭМП в ЗВО?

Как ЭМП влияет на условия формирования дендритов?

Как ЭМП влияет на дефекты ликвационного и усадочного характера?

Назовите дефекты, развитие которых подавляется организацией ЭМП металла в кристаллизаторе.

Назовите дефекты, развитие которых подавляется организацией ЭМП металла в ЗВО.

Назовите дефекты, развитие которых подавляется организацией ЭМП металла в зумпфовой.

Назовите преимущества и основной недостаток мультиэлектромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл.

Для каких сталей использование ЭМП является наиболее эффективным?

ЛЕКЦИЯ №18.
Система механического «мягкого» обжатия заготовки

Идея горячей деформации слитков с наличием жидкой сердцевины известна достаточно давно. Она прошла широкое опробование на металлургических слитках. При этом обжатие слитков с жидкой фазой обеспечивает значительное снижение осевой пористости и повышает однородность внутренней структуры. Вместе с тем в силу ряда технологических и технических соображений (например, высокая вероятность выливания жидкой фазы) использование ее для слитков оказалось достаточно проблематичным.

В последние 10-15 лет для подавления осевой пористости и ликвации все большее применение получает метод «мягкого» обжатия (“*soft reduction*”) непрерывнолитой заготовки в конце цикла затвердевания (рис 18.1). Сущность этого метода заключается в том, что непрерывнолитая заготовка подвергается дополнительному обжатию (на несколько миллиметров) в нижней части ЗВО.

Рис.18.1. Схема регулирования обжатия сляба в области окончания жидкой лунки

Первоначально метод «мягкого» обжатия предполагал деформацию заготовки с помощью специальных роликов в зоне ее выравнивания (рис. 18.2). Этот вариант представляется достаточно привлекательным с точки зрения простоты технической реализации. Однако на самом деле, как показали исследования, существует несколько серьезных препятствий для эффективной реализации этой схемы:

• обжатие заготовки происходит в строго фиксированных точках, что требует точного контроля температуры разливки и режимов охлаждения, поскольку в противном случае происходит смещение положения точки окончания зоны жидкой фазы, а эффект обработки нивелируется;

• обжатие заготовки требует значительных усилий, величина которых резко возрастает с увеличением доли твердой фазы, однако при большой доле жидкой фазы эффект динамического обжатия оказывается крайне незначительным из-за простого перетекания металла, - это практически полностью исключает подавление осевой ликвации и крайне слабо влияет на уменьшение пористости.

Рис.18.2. Схема размещения оборудования для динамического «обжатия» сляба: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промковш; 3 – кристаллизатор; 4 – точка разгиба; 5 – зона контролируемого обжатия; 6 – тянущая клеть

По существу задача реализации метода «мягкого» обжатия непрерывнолитой заготовки должна включать в себя следующие основные компоненты:

• определение места приложения усилия обжатия (соотношения между количеством жидкой и твердой фазы в момент обжатия);

• определение закона приложения обжатия (обжатие в один или же несколько этапов);

- определение способа приложения усилия обжатия к поверхности заготовки.

Теоретическое определение величины обжатия рекомендуется выполнять по следующей формуле:

$$D_o = (D_1 + D_2)/\eta + D_3, \qquad (18.1)$$

где D_1– суммарное обжатие, требуемое для предотвращения движения (вытекания) жидкой стали из зоны затвердевания; D_2 – суммарное обжатие, требуемое для предотвращения перетекания стали при выпучивании заготовки (при использования обжатия с помощью плоских брусов величина D_2 равна 0); D_3.– суммарная термическая усадка твердой фазы при понижении температуры в ходе обжатия (определяется расчетным путем на основании анализа процессов теплопереноса в зоне обжатия); η – коэффициент пропорциональности, учитывающий перенос поверхности внутреннего фронта затвердевания и, соответственно, условия горячей деформации заготовки.

Например, для сляба толщиной 280 мм при скорости разливки 1,2 м/мин рекомендуемые оптимальные данные имеют следующие значения: D_1 = 0,26 мм/м, D_2= 0,00 мм/м, D_3 = 0,20 мм/м, η = 0,3-0,4 мм/м, D_o = 0,85-1,07 мм/м.

В настоящее время при реализации технологии мягкого обжатия предпочтение отдается конструктивной схеме, представленной на рис.18.3.

Такая схема реализуется системой из 10-12 пар роликов, объединенных, как правило, в две специальные секции. Наличие большого количества точек приложения усилия сжатия позволяет рассредоточить процесс деформации заготовки на участке длиной несколько метров. Это снижает вероятность образования внутренних трещин в твердом каркасе заготовки. Кроме того, в зависимости от конкретных условий разливки место начала и окончания процесса деформации может быть скорректировано за счет вывода из работы нескольких пар крайних роликов. Это дает возможность варьировать скорость разливки и режимы охлаждения заготовки.

Рис.18.3. Схематическое представление реалиазции метода «мягкого» обжатия с помощью специальных роликов

Рассмотренная схема является универсальной и используется в слябовых, блюмовых (рис 18.4) и сортовых МНЛЗ.

Рис.18.4. Фотография зоны «мягкого» обжатия шестиручьевой блюмовой МНЛЗ

Максимальный эффект подавления осевой ликвации достигается при минимальном колебании параметров разливки в условиях обеспечения минимального выпучивания заготовки в зоне обжатия. Это достигается путем постоянного контроля соприкосновения поверхности пинч-роликов с поверхностью заготовки. На рис.18.5 представлено сравнение фотографий продольных темплетов (горячее травление) непрерывнолитой заготовки с «мягким» обжатием (слева) и без него (справа). В целом они

свидетельствуют о высокой эффективности метода «мягкого» обжатия при рациональном выборе режимов воздействия.

Рис.18.5. Общий вид продольных травленых темплетов с «мягким» обжатием (слева) и без него (справа)

Определенные особенности имеет применение метода «мягкого» обжатия для динамического воздействия на внутренние объемы затвердевающих блюмов большого сечения. Это следует связывать, прежде всего, с устойчивостью твердого каркаса заготовки. Во-первых, твердый каркас затвердевающего блюма, безусловно, имеет значительно большую жесткость, чем у сляба, что существенно увеличивает требуемое удельное усилие обжатия. Это, в свою очередь, повышает вероятность образования внутренних трещин по границам дендритов (рис.18.6).

С другой стороны, приложение обжатия по двум граням (как было рассмотрено выше) обязательно вызывает изгиб (выпучивание) двух других граней, что в значительной степени может изменить условия движения металла в жидкой сердцевине и снизить до минимума эффект подавления осевой ликвации вследствие эффекта «перетекания» жидкой фазы. Рассмотренные отличия между динамическим «мягким» обжатием слябов и блюмов предопределяют создание специальных технологических приемов.

Рис.18.6. Схема образования внутренних трещин в ходе «мягкого» обжатия

Для повышения эффективности «мягкого» обжатия на ряде заводов Европы и Японии внутренней полости кристаллизатора придают специальную геометрическую форму, обеспечивающую формирование приливов на поверхностях блюма, подвергаемых обжатию (рис.18.7).

Рис.18.7. Геометрическая форма внутренней полости кристаллизатора для отливки блюмов с «мягким» обжатием.

В районе зумпфовой зоны (после первой тянущей клети) с помощью специальных обжимных клетей эти приливы металла определенным образом

вдавливаются в тело заготовки, которая принимает форму квадрата или прямоугольника. Это обеспечивает уменьшение внутреннего объема заготовки, улучшает условия питания жидким металлом твердого каркаса и предотвращает формирование раковин усадочной пористости. Достижение максимального положительного эффекта в части подавления осевой усадочной пористости связывается с рациональным выбором объема вдавливаемого металла, а также места начала и окончания обжатия. Наибольший эффект, как правило, достигается при вдавливании приливов в 3-5 этапов с регламентированным расположением точек приложения нагрузки по длине заготовки.

Таким образом, для успешной обработки заготовки методом «мягкого» обжатия необходимо соблюдать определенную совокупность условий:

- наличие данных об оптимальном соотношении твердой и жидкой фазы в месте приложения усилия обжатия применительно к конкретным условиям;
- определение величины оптимальных значений степени обжатия, значений прилагаемых усилий и динамики приложения усилия обжатия;
- наличие системы, способной в реальном масштабе времени определять профиль затвердевания в зависимости от скорости литья, марки сталей, условий первичного и вторичного охлаждения и перегрева металла в промковше;
- наличие системы, позволяющей оперативно корректировать точку приложения усилия обжатия в зависимости от изменения условий разливки.

Контрольные вопросы.

Назовите сущность метода «мягкого» обжатия.

Что обеспечивается обжатием слитков с жидкой фазой?

В чем заключаются основные недостатки метода «мягкого» обжатия заготовки с помощью специальных роликов в зоне ее выравнивания?

Какие основные компоненты должна включать в себя задача реализации метода «мягкого» обжатия непрерывнолитой заготовки?

Охарактеризуйте особенности динамического воздействия метода «мягкого» обжатия на внутренние объемы затвердевающих блюмов большого сечения.

Назовите основные пути повышения эффективности «мягкого» обжатия блюмов?

Назовите совокупность условий, которые необходимо соблюдать для успешной обработки заготовки методом «мягкого» обжатия.

MSR segments no.
1
2
3
4
5
6
casting direction

ЛЕКЦИЯ №19

Основные дефекты непрерывнолитых заготовок

Дефектом непрерывнолитой заготовки принято считать отклонение от предусмотренного техническими условиями качества заготовки или металлопродукции, которое частично или полностью нарушает совокупность технологических или эксплуатационных свойств изделия (сплошность, химический состав, структура и т.п.).

Отдельные дефекты непрерывнолитой заготовки могут быть идентифицированы уже непосредственно при их визуальном осмотре, а для определения остальных необходимо отбирать из заготовок специальные образцы. Порядок отбора проб и классификация дефектов регламентируются техническими условиями, которые могут изменяться в зависимости от сечения заготовки, ее назначения и т.п. Технические условия для непрерывнолитой заготовки, которая является полупродуктом, могут отличаться в различных странах и компаниях.

Между тем большое количество непрерывнолитых заготовок, которое получается в процессе разливки, практически исключает возможность тщательного осмотра всех заготовок в силу целого ряда технических трудностей. Поэтому в металлургической практике большое применение получили способы выборочного контроля непрерывнолитой заготовки, методика которых базируется на большом практическом опыте и законах статистики.

Все дефекты, встречающиеся в непрерывнолитых заготовках, можно условно разделить на следующие группы (рис.19.1):

-дефекты геометрической формы заготовки;

-поверхностные и подповерхностные дефекты;

-внутренние дефекты, которые располагаются внутри тела заготовки.

К числу основных дефектов непрерывнолитых заготовок следует отнести: дефекты геометрической формы, поверхностные продольные, поперечные и паукообразные трещины, внутренние трещины, дефекты в сердцевине слитка, поры и участки шлаковых включений и т.п.

Рис.19.1. Схематическое представление основных видов дефектов непрерывнолитой заготовки: 1-глубокие продольные трещины на поверхности; 2-продольные трещины в зоне кромок; 3-короткие продольные трещины; 4-поперечные трещины по грани; 5-поперечные трещины в кромках; 6-паукообразные (звездообразные) трещины; 7, 8-внутренние трещины в продольном направлении; 9-угловые внутренние трещины; 10-угловые трещины; 11-осевые трещины; 12-поры и участки шлаковых включений на поверхности; 13-поры и шлаковые включения в виде гнезд, расположенных в продольных дорожках; 14-поры по всей поверхности слябов; 15-неметаллические включения на поверхности и подповерхностью; 16-осевая ликвация; 17-осевая пористость; 18-подповерхностные дефекты; 19-пояса и завороты

Общая характеристика основных видов дефектов геометрической формы и поверхности непрерывнолитой заготовки обобщена в табл.19.1.

Дефекты геометрической формы наиболее ярко проявляются для сортовой заготовки. Главным из них является ромбичность (рис.19.2).

Рис.19.2. Ромбичность сортовой заготовки (квадрат 150х150 мм)

Образование трещин в непрерывнолитой заготовки может быть вызвано различными причинами: низкими пластичностью и прочностью твердого каркаса при высоких температурах, металлургическими особенностями процесса кристаллизации, ферростатическим давлением, которое испытывает твердая оболочка слитка, температурными напряжениями, трением при изгибе-разгибе, механическими нагрузками и деформациями и пр. Если суммарная нагрузка создает в твердом каркасе напряжения, превышающие критические, то в процессе затвердевания развиваются трещины.

При этом для затвердевания поверхностных слоев заготовки характерны сильные перепады температур и интенсивный массо- и теплоперенос. В местах искажения температурных полей, как правило, также образуются поверхностные дефекты в виде трещин.

Поверхностные дефекты в значительной степени определяются механическими характеристиками формирующейся стальной оболочки. Поскольку твердая корочка состоит из жидко-твердой фазы и полностью твердого каркаса (рис.19.3), его механика достаточно сложна.

Рис.19.3. Схема микроструктуры оболочки твердого каркаса с дендритными зернами

В поперечном направлении жидко твердый каркас практически не имеет прочности. Причину данного явления следует искать в присутствии в междend-

ритном и межзеренном пространстве жидких пленок с нулевым сопротивлением сдвигу. Можно условно считать, что твердая оболочка состоит из пяти зон, отличающихся своей морфологией и механическими характеристиками:

-зона свободного вытекания жидкости из междендритного пространства;

-зона ограниченного вытекания («невытекания») жидкости из междендритного пространства и образования участков жидкой пленки (отмечен красным);

- участок жидких вкраплений в твердых зернах (отмечен синим) и пленок по границам зерен;

-участок жидких вкраплений капель в твердых зернах и на их границах;

-полностью затвердевший участок твердого каркаса.

При этом определенную прочность имеет только участок с твердой фазой. Основные виды поверхностных трещин приведены на рис.19.4-19.8.

Рис.19.4. Продольная угловая трещина на слябе

Рис.19.5.Продольная трещина посередине широкой грани сляба

Рис.19.6. Угловые поперечные трещины (сляб)

Рис.19.7. Поперечные трещины по широкой грани сляба

Рис.19.8. Наплыв металла вследствие поперечной трещины в кристаллизаторе

Появление газовых пор на поверхности заготовки (небольшие углубления сферической формы) обычно обусловлено повышенной влажностью ШОС или повышенным расходом или влажностью масла, подаваемого при разливке открытой струей (рис.19.9).

Рис.19.9. Поры и газовые пузырьки в поверхностном слое

Паукообразные (звездообразные) трещины (рис.19.10) характерны, прежде всего, для перитектического класса сталей (содержание углерода 0,12-0,18%). Они представляют собой тонкие трещины длиной несколько миллиметров в виде расходщимися лучами «звезд» и т.п.

Рис.19.10. Паукообразные трещины

Они образуются под поверхностью непрерывнолитой заготовки, что затрудняет их визуальное обнаружение непосредственно после охлаждения.

Однако при последующей прокатке они раскатываются в трещины или разрывы, что приводит к дефектам металлопродукции. На практике для сталей, подверженных появлению паукообразных трещин, осуществляется дополнительный контроль заготовок посредством механической зачистки поверхности (например, «змейкой»), глубиной 1-2 мм.

Поскольку формирование паукообразных трещин происходит в кристаллизаторе, то наиболее эффективным средством их подавления является применение ШОС, которые несколько снижают отвод тепла от твердой корочки.

Общая характеристика внутренних дефектов непрерывнолитой заготовки обобщена в табл.19.2. Фактически эта группа дефектов находится в прямой взаимосвязи с процессами затвердевания заготовки, которые были рассмотрены нами ранее. При этом проявление этих дефектов, как правило, связано с отклонением качества стали или процессов литья от номинальных.

Таблица 19.1. Общая характеристика дефектов формы и поверхности непрерывнолитой заготовки

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения	Меры по предупреждению
1.Ромбичность	Профиль поперечного сечения имеет форму ромба	Напряжения в корке заготовки из-за неравномерного отвода тепла в кристаллизаторе, износ рабочих стенок и отклонения геометрических параметров кристаллизатора	Равномерный теплоотвод, контроль геометрии гильзы кристаллизатора, контроль работы форсунок в зоне вторичного охлаждения
2.Раздутие (выпуклость)	Бочкообразность поперечного сечения	Высокая скорость или температура разливки, недостаточное охлаждение гильзы кристаллизатора, неудовлетворительная настройка правильно-тянущей клети	Соблюдение температурного и скоростного режима разливки, режимов охлаждения, контроль геометрических параметров кристаллизатора
3.Продольная угловая трещина	Трещина, проходящая вдоль оси заготовки	Износ донной части кристаллизатора, неравномерное охлаждение заготовки в кристаллизаторе, повышенная температура стали в промковше, высокое содержание вредных примесей (S, P, Sn, Pb, Sb)	Контроль за геометрическими параметрами кристаллизатора, поддержание оптимальной температуры разливки, ограничение содержания вредных примесей и пр.
4.Продольная трещина посередине грани	Трещина, проходящая по середине широкой грани	Неравномерное охлаждение по ширине сляба	Контроль распределения воды по ширине сляба в ЗВО
5.Поперечные трещины	Трещина, проходящая по боковой поверхности граней поперек продольной оси заготовки	Неравномерное затвердевание заготовки, повышенное трение слитка в кристаллизаторе, действие циклических надрывов оболочки при качании кристаллизатора, зависание слитка в кристаллизаторе	Соблюдение температурного интервала разливки, контроль за состоянием кристаллизатора, соблюдение режимов вторичного охлаждения, соблюдение режимов смазки и пр.
6.Поры	Углубления или полые пространства на поверхности заготовки	Избыточная влажность или избыточное количество смазочного масла с завышенным кислотным числом, газовыделение из смазочного материала у края кристаллизатора	Регламентированное использование смазочного материала, обеспечение требуемой раскисленности стали
7.Следы качания кристаллизатора	Надрывы оболочки заготовки в виде поперечных углублений	Неправильный выбор режимов качания кристаллизатора, смазки, температуры разливки, а также неправильная настройка поддерживающих роликов	Соблюдение оптимального режима возвратно-поступательного движения кристаллизатора, контроль за состоянием кристаллизатора
8.Загрязнения на поверхности заготовки	Скопление неметаллических включений в виде частично залитых металлом частицах шлака	Размыв огнеупоров ковша, затягивание шлака из промковша, всплывшие из металла продукты вторичного окисления	Соблюдение технологии внепечной обработки стали, применение огнеупоров высокого качества и качественной ШОС в кристаллизаторе
9.Паукообразные трещины	Расходящиеся от центра тонкие трещины	Внутренние напряжения вследствие местного экстремального периодического переохлаждения или разогрева поверхности заготовки	Использование специальных ШОС в совокупности с равномерной подачей водовоздушной смеси в зоне вторичного охлаждения

Таблица 19.2. Общая характеристика дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения	Меры по предупреждению
1.Осевая пористость	Поры различного размера, локализованные вблизи теплового центра заготовки	Неправильный выбор режимов разливки, в том числе и высокий уровень перегрева стали в промковше и неравномерное охлаждение заготовки	Уменьшение перегрева стали в промковше, обеспечение большей температурной однородности стали по длине промковша
2.Осевая химическая неоднородность	На продольных темплетах наблюдается в виде отдельных точек, сплошного шнура или V–образных участков повышенной травимости	Температурная усадка стали, высокий уровень перегрева стали в промковше, повышенное содержание ликвирующих элементов (C, S, P)	Уменьшение перегрева стали в промковше, обеспечение большей температурной однород-ности стали по длине промковша, снижение содержания серы и фосфора в стали
3.Осевые трещины	Чаще всего имеют «паукообразный» вид	Вследствие термических напряжений, возникающих при неправильном выборе режимов в зоне вторичного охлаждения	Оптимизация режимов подачи воды в зоне вторичного охлаждения, повышение однородности водовоздушной смеси
4.Трещины, перпендикулярные граням, угловые трещины	Нитевидные потемнения повышенной травимости по контуру заготовки	Вследствие термических напряжений, возникающих при неправильном выборе режимов в зоне вторичного охлаждения и искажения профиля заготовки	Оптимизация режимов охлаждения заготовки, выбор рациональных смазок или шлакообразующих смесей
5.Деформационные трещины	В поперечном сечении имеют вид гнездообразного скопления трещин или полос повышенной травимости; продольном – слой трещин примерно одной длины	Вследствие деформации заготовки в 2-х фазном состоянии роликами зоны вторичного охлаждения и разгиба	Контроль установки роликов зоны вторичного охлаждения и разгиба
6.Точечная неоднородность	Точечные скопления ликватов вблизи поверхности преимущественно по стороне меньшего радиуса	Вследствие нарушения режимов раскисления стали, неправильно выбранного расходом или состава шлакообразующей смеси, разрушения огнеупоров и пр.	Оптимизация условий раскисления стали, защита от вторичного окисления, продувка стали аргоном, использование качественных огнеупоров и смесей
7.Внеосевая химическая неоднородность	Полоса более светлая, чем основной фон серного отпечатка или полоса пониженной травимости	Наблюдается при использовании электромагнитного перемешивания металла или при нестабильной технологии литья	Оптимизация режимов электромагнитного перемешивания и выбор места его приложения

Макроструктура сортовой заготовки (ромбичность 7 мм)	**Макроструктура сортовой заготовки (правильная геометрическая форма)**

Осевая усадочная пористость заготовки (продольный темплет)	**Газовая пористость заготовки**

Серный отпечаток продольного сечения сортовой заготовки с ликвационными дефектами (на верхней грани – ужимина, связанная с усадкой)

Контрольные вопросы

Что принято считать дефектом непрерывнолитой заготовки?

ЛЕКЦИЯ №20

Системы автоматизации непрерывной разливки стали – 1: Система автоматического поддержания уровня металла

Одним из основных преимуществ современных машин для непрерывной разливки стали является высокая степень автоматизации процесса разливки в целом, а также отдельных функциональных операций.

В общем виде принято различать автоматические и автоматизированные (компьютеризированные) системы управления. В системах *автоматического* управления (САУ), состоящих из объектов управления и управляющего устройства, человек непосредственного участия в процессе управления не принимает. В отличие от САУ *в автоматизированных* (компьютеризированных) системах управления (КСУ) предполагается обязательное участие людей в процессах управления. Принципиальное отличие КСУ от традиционной системы управления состоит в том, что в КСУ часть управленческих работ, а именно сбор, анализ, и преобразование информации, выполняется с помощью вычислительной техники.

Основной экономический эффект от внедрения АСУ (КСУ) для технологических процессов непрерывной разливки стали достигается за счет повышения уровня организации процесса разливки, более полной загрузки оборудования, обеспечения ритмичности работы МНЛЗ, сокращения непроизводительных потерь, в том числе и за счет предотвращения аварийных ситуаций, что в итоге повышает производительность труда и снижает издержки производства, а также повышает качество заготовки. Это достигается благодаря полноте, своевременности и оптимальности принимаемых решений, а также экономии управленческого труда без ущерба для качества управления.

Поддержание процесса разливки в автоматическом режиме удается обеспечить за счет работы следующих основных систем управления процессом литья:

-система автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе;

-система прогнозирования и предотвращения прорывов металла под кристаллизатором;

-динамическая система охлаждения заготовки в ЗВО;

-система автоматической подачи ШОС в кристаллизатор МНЛЗ и т.д.

Кроме того, на современных МНЛЗ предусмотрено достаточно большое количество подсистем, которые выполняют следующие важные задачи: контроль и поддержание массы металла в промковше, контроль температуры металла в промковше, контроль усилия на тянущей клети, контроль температуры поверхности заготовки под кристаллизатором (зона 2 или 3), контроль и поддержание параметров качания кристаллизатора и т.п.

Система автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе обеспечивает поддержание уровня металла для условий разливки как открытой струей, так и при использовании системы «стопор - погружной стакан».

Стабилизация уровня металла в кристаллизаторе является важнейшей и наиболее сложной задачей автоматизации МНЛЗ. Колебания уровня металла приводят к снижению качества заготовки. При падении уровня всего на несколько миллиметров происходит окисление внутренней поверхности твердой корочки, что приводит к подповерхностным дефектам вследствие образования несплошностей. При повышении уровня металла на несколько миллиметров происходит его залив за твердую корочку. Это приводит к увеличению глубины следов качания и захвату неметаллических и шлаковых включений.

Положение уровня металла в кристаллизаторе связано с величиной расхода стали, поступающей из промковша, и скоростью вытяжки заготовки из кристаллизатора. Эти величины не зависят от уровня металла в кристаллизаторе (контролируемой величины) и, следовательно, объект регулирования не обладает свойством самовыравнивания. Между тем, совершенно очевидно, что уровень металла в кристаллизаторе будет оставаться неизменным, если в единицу времени будет поступать и выходить одинаковое количество стали.

При стационарном режиме разливки, как правило, нет интенсивных возмущений, влияющих на положение уровня металла в кристаллизаторе. Главные возмущения, которые оказывают влияние на уровень металла в кристаллизаторе, являются изменение уровня налива металла в промковше (например, при замене сталеразливочного ковша), размывание или зарастание внутренней полости стакан-дозатора или погружного стакана, размывание или разрушение стопора-моноблока и т.п.

Контроль уровня металла в кристаллизаторе осуществляется с помощью специальных датчиков, принцип работы которых основан на фиксировании положения уровня посредством радиоактивного или электромагнитного излучения, которые передают сигнал на привод перемещения стопора или ТПК.

В основе измерения уровня при помощи искусственных радиоактивных изотопов лежит принцип поглощения радиоактивного излучения жидкой сталью, расположенной в кристаллизаторе. Луч, излучаемый радиоактивным источником, проникает через кристаллизатор по прямой линии (рис.20.1).

Рис.20.1. Схема установки радиоактивного датчика в кристаллизаторе

На стенке кристаллизатора, лежащей напротив излучателя, расположен приемник, преобразующий принятые лучи в электрические импульсы. Вследствие поглощения радиоактивных лучей жидкой сталью интенсивность принятого излучения зависит от высоты уровня металла в кристаллизаторе.

Радиоактивное измерительное устройство состоит из стержневидного материала кобальт-60, сцинтилляционного счетчика и специального усилителя.

Источники радиоактивного излучения и счетчики размещают на кристаллизаторе таким образом, чтобы через участок, на котором в процессе разливки стали должен установиться ее уровень, могли проходить и улавливаться счетчиком радиоактивные изотопы, поступающие от источника их излучения.

Толщина и плотность просвечиваемого материала определяют степень поглощения радиоактивного излучения и, следовательно, число изотопов, улавливаемых счетчиком. При повышении или понижении уровня стали на участке измерения его высоты в кристаллизаторе происходит большее или меньшее перекрытие радиоактивного излучения и вместе с тем изменение числа гамма-квантов, улавливаемых счетчиком. Следовательно, количество попадающих на счетчик гамма-квантов служит мерой высоты уровня жидкой стали в кристаллизаторе.

Мощность источника излучения должна обеспечивать около 3000-4000 импульсов в секунду, так как при этом наблюдаются меньшие статические колебания. Мощность источника излучения должна быть такой малой, чтобы по возможности не создавалась или создавалась весьма небольшая контролируемая зона; при этом, прежде всего, учитывают опасность для здоровья обслуживающего персонала.

При использовании аппаратуры для контроля уровня металла на сортовых и блюмовых машинах источник и приемник излучения размещаются стационарно вне кристаллизатора. На мощных слябовых МНЛЗ источник и приемник размещаются непосредственно в стенке кристаллизатора в специальных приливах.

Наряду с использованием радиоизотопных измерителей уровня за рубежом ведутся интенсивные поиски новых средств контроля уровня металла в кристаллизаторе, более простых с точки зрения размещения их в составе оборудования и более надежных и безопасных в эксплуатации. Одним из таких методов является метод, основанный на использовании вихревых токов, индуктируемых катушкой, размещенной над зеркалом жидкого металла в кристаллизаторе (рис.20.2).

Рис.20.2. Схема установки электромагнитного датчика над кристаллизатором

Измерительная катушка получает питание от высокочастотного генератора (50 кГц) через усилитель с положительной обратной связью. В зависимости от положения зеркала металла полное сопротивление измерительной катушки, зависящее от ЭДС, наводимой в ней вихревыми токами, также изменяется, что служит мерой положения уровня жидкого металла в кристаллизаторе. Измерительная катушка размещается в специальном защитном керамическом стакане, который охлаждается воздухом. Постоянная времени срабатывания комплекса составляет менее 0,2 с, а точность измерения положения уровня ±1 мм.

Датчик крепится на специальном штативе, который перемещается разливщиками вручную и устанавливается при измерении уровня металла на краю кристаллизатора. Отличительной особенностью данной конструкции является ее простота, что позволило ряду фирм, например, в Китае и в России, повторить эту конструкцию в тех или иных вариантах. Недостатки такого датчика связываются с- неудобствами в работе из-за наличия кабелей связи и шланга, подводящего охлаждающий воздух, которые в большинстве случае находятся непосредственно на разливочной площадке и подвержены механическим и тепловым воздействиям. Они также могут ограничивать действия разливщика и добавляют дополнительные технологические операции (операции установки и снятия датчика в начале и в конце разливки, а также в аварийных ситуациях).

Другим существенным недостатком рассмотренной конструкции является значительный расход комплектующих (датчиков, кожухов, подставок, кабелей, шлангов), особенно при низкой технологической дисциплине персонала.

Конструкция датчика фирмы VUHZ (Чехия), встроенного в кристаллизатор (рис.20.3), полностью лишена указанных недостатков и приближается по эксплуатационным характеристикам к изотопным датчикам.

Ключевым элементом концепции анализа поведения уровня металла в кристаллизаторе является полное понимание источников происхождения различного рода периодических возмущений зеркала металла.

Рис.20.3. Внешний вид датчика, встраиваемого в кристаллизатор

Как видно из рис.20.4, колебания поверхности металла в кристаллизаторе могут существенно различаться в течение периода в 10-20 секунд, имея различные источники происхождения возмущений. Диаграммы колебаний уровня металла взяты с двух различных МНЛЗ.

а **б**

Рис.20.4. Колебания уровня металла в кристаллизаторе для различных возмущений: а – возмущения, связанные с гистерезисом стопорного механизма; б – возмущения, вызванные эффектом выпучивания заготовки

В первом случае колебания поверхности связаны с гистерезисом (запаздыванием) срабатывания стопорного механизма, а во втором – вследствие развития эффекта выпучивания заготовки (рис.20.5) между опорными роликами (это явление сопровождается периодическими возмущениями уровня металла в кристаллизаторе с частотой 0,04-0,12 Гц).

В целом же на практике известны различные формы неустойчивых колебаний уровня металла в кристаллизаторе, которые могут быть условно разбиты на две группы: внезапно возникающие и периодические возмущения.

Внезапно возникающие возмущения достаточно легко идентифицируются, так как они, как правило, связаны со значимыми для технологического процесса событиями. Например, это может быть изменение скорости литья или отрыв от поверхности погружного стакана некоторого количества отложившегося корунда (рис.20.6) и т.п.

Рис.20.5.Схема проявления эффекта «выпучивания» при разливке

Рис.20.6. Схема накопления образования отложений и изменения положения стопора при разливке

Эти возмущения достаточно легко отслеживаются благодаря соответствующим электрическим сигналам, поступающим на пульт управления (рис.20.7).

Периодически возникающие возмущения обычно связаны с проявлением эффекта выпучивания заготовки и с образованием волн на поверхности металла в кристаллизаторе. Волны на поверхности металла в кристаллизаторе наиболее ярко проявляются в случае разливки широких слябов с высокой скоростью. Частота таких колебаний обычно составляет 0,7-1,2 Гц. При этом меньшие значения частоты относятся к большей ширине кристаллизатора. В некоторых случаях эти волновые возмущения настолько усиливаются, что могут расстроить систему автоматического контроля уровня и привести к всплескам металла или прорывам.

Рис.20.7. Колебания положения стопора (красная линия) в процессе разливки вследствие накопления отложений корунда

Наличие различных источников возмущений требует системного анализа и отработки управляющего импульса, определяющего положение стопора и скорость разливки (для бесстопорной разливки).

Показатель точности дозирования потока стали в системе «стопор – стакан-дозатор» во многом зависит от функциональных возможностей привода механизма положения стопора. Поэтому конструкции механизма перемещения стопора (рис 20.8) и его приводу уделяется большое внимание.

Рис.20.8. Схема системы, обеспечивающей оперативное изменение положения стопора

Типовыми показателями работы системы дозирования стали являются значения расхода в пределах 0,3-1,0 л/сек/мм, что обеспечивает регулирование

в пределах хода стопора от 10 до 20 мм. То есть точность положения стопора, большая, чем 0,1 мм (1% от полного хода), обязательно требуется для удовлетворения гарантированной работы исполнительного механизма его привода.

Контрольные вопросы

Чем отличаются системы *автоматического* управления (САУ) от *автоматизированных* (компьютеризированных) систем управления (КСУ)?

За счет чего достигается основной экономический эффект от внедрения АСУ (КСУ) для технологических процессов непрерывной разливки стали?

Назовите основные системы автоматизированного управления процессом литья.

Как работа системы контроля уровня металла в кристаллизаторе сказывается на качестве непрерывнолитой заготовки.

Охарактеризуйте принцип работы системы контроля уровня металла.

Опишите особенности размещения элементов СКУ для разливки различных типоразмеров заготовок.

Проанализируйте преимущества и недостатки различных конструкций СКУ.

Как работа системы дозирования стали влияет на колебания уровня металла в кристаллизаторе?

ЛЕКЦИЯ №21

Системы автоматизации непрерывной разливки стали - 2:

Система прогнозирования и предотвращения прорывов металла

Прорывы металла под кристаллизатором МНЛЗ являются наиболее часто встречающейся технологическая ситуацией, которая сопровождается авариями, серьезными потерями производительности машины и ухудшением качества заготовки. Вероятность образования прорывов возрастает с повышением скорости разливки и при отклонении режимов литья от номинальных.

Для предотвращения прорывов необходимо по возможности на более ранней стадии получить информацию о возможности возникновения прорыва. Принято считать, что основной причиной прорывов заготовки под кристаллизатором является прилипание твердой корочки к его стенке (рис.21.1).

Рис.21.1. Схема образования прорыва в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ: по грани (слева) и по углу (справа)

Кроме того, прорывы могут иметь место, при нарушениях технологических операций в процессе замены промковша и на старте (в начале) разливки, при чрезмерных колебаниях уровня металла в кристаллизаторе, быстром изменении скорости вытяжки заготовки, неправильно выбранной или некондиционной ШОС, недостаточной конусности кристаллизатора и интенсивности охлаж-

дения в нем, недостаточной раскисленности стали, повышенном содержание водорода и пр.

Прилипание корочки происходит непосредственно под зеркалом металла, поскольку корочка в этой зоне тонкая и непрочная. Кроме того расплавленный слой ШОС, выполняющий функцию смазки, в этой зоне еще недостаточно хорошо распределяется по поверхности контакта. Соответственно часть твердой корочки контактирует непосредственно с медной поверхностью кристаллизатора, что повышает силу трения на этом участке. Это приводит к появлению открытой трещины под местом прилипания, которая все больше открывается с каждым циклом качания.

Принцип обнаружения момента прорыва корочки в кристаллизаторе основывается на замере температуры внутренней поверхности медных в двух-трех уровнях стенок кристаллизатора посредством специальных термопар (рис.21.2). Количество и расположение термопар зависит от конфигурации кристаллизатора и максимальной скорости разливки.

Рис.21.2. Схема индикации возможного прилипания (прорыва) по показаниям термопар

Работа системы предотвращения прорывов базируется на сравнении показателей величины разности температур от двух термопар, расположенных одна над другой. При этом температура поверхности заготовки в области разрыва корочки несколько выше, чем в прилегающих зонах, что провоцирует возникновение трещин в твердой корочке. В случае обнаружения прорыва корочки на некоторое время снижается скорость вытяжки заготовки, что позволяет залечить место прорыва.

Соответственно принцип работы системы предупреждения прорывов базируется на сравнении температуры поверхности заготовки в различных точках по высоте и ширине кристаллизатора. Для этого в стенки кристаллизатора у их внутренней поверхности устанавливаются два ряда термопар, расположенных друг от друга на расстоянии 0,20-0,25 м по высоте (рис 21.3). В процессе разливки фиксируется температура поверхности заготовки для каждой термопары, а также разность в измерениях по высоте.

Рис.21.3. Схема расположения термопар в стенках кристаллизатора

Характерная ситуация с изменением величины температуры при возникновении прилипания приведена на рис.21.4.

Рис.21.4. Динамика изменения температуры стенки при возникновении прилипания

В течение нормального режима работы показания термопар остаются стабильными (этап I). При этом величина температуры для верхней термопары выше, чем для нижней. Начальный момент появления точки прилипания (этап

II) фактически никак не отражается на показаниях термопар. При подходе дефекта (прорыва) корочки к верхней термопаре происходит значительное повышение температуры, фиксируемой верхней термопарой (этап III). При этом показания нижней термопары остаются неизменными. Далее место дефекта отходит от верхней термопары и подходит к нижней (этап IV) со скоростью вытяжки заготовки, что соответствует прохождению максимума температуры верхней термопарой и повышению температуры, фиксируемой нижней термопарой. По мере прохождения местом дефекта нижней термопары происходит падение величины температуры, фиксируемой верхней термопарой, до номинальной величины (до возмущения), а для нижней термопары наблюдается рост величины температуры до максимального значения (этап V). После прохождения дефектом положения нижней термопары ее показания также выходят на номинальный уровень.

Следует иметь в виду, что развитие прорыва идет влево и вправо от первоначальной точки прилипания (рис.21.3), что и дает возможность судить о вероятности возникновения аварийной ситуации под кристаллизатором.

Полученные с термопар данные с помощью компьютерной обработки позволяют получить картину распределения температуры по поверхности заготовки в динамике в режиме текущего времени (рис.21.5).

Рис.21.5. Динамика изменения температуры поверхности заготовки, разности температур соответствующих точек и идентификации «опасных» ситуаций

При этом автоматическая система прогнозирования прорывов использует определенную совокупность критериев, позволяющих судить о динамике развития негативных явлений, связанных с прилипанием корочки. Например, расширение зоны прилипания корочки (пониженной температуры) служит исходной информацией для снижения скорости вытяжки заготовки или полной остановки машины. В случае если динамика изменения температур в некоторой идентифицированной зоне имеет склонность к образованию прорыва (например, трещины в твердой корочке заготовки), то система управления извещает об этом оператора МНЛЗ и рекомендует ему выполнить операцию снижения скорости вытяжки заготовки (или эта операция выполняется в автоматическом режиме). Снижение скорости вытяжки заготовки (рис.21.6) позволяет залечить прорыв и придать корочке необходимую прочность.

Рис.21.6. Схема изменения скорости вытяжки заготовки в случае отработки системой предотвращения прорывов команды «Тревога» (Alarm)

Между тем даже при снижении скорости разливки на поверхности сляба остаются участки, пораженные поверхностными и подповерхностными складками и трещинами (рис.21.7), которые рассматриваются как брак готовой продукции и требуют либо огневой зачистки, либо вырезания из сляба.

В конечном счете, любое торможение МНЛЗ следует рассматривать как фактор, который снижает ее производительность и требует дополнительных мероприятий по удалению возникших дефектов заготовки.

Рис.21.7. Фотография поверхности сляба с явно выраженным поверхностным дефектом, связанным с прорывом корочки в кристаллизаторе

Главное окно, которое видит оператор МНЛЗ на экране монитора при работе системы предотвращения прорывов, выглядит следующим образом (рис.21.7).

Рис.21.7. Окно монитора оператора МНЛЗ при передаче информации о возможности прорыва

На практике такая система предотвращения прорывов обеспечивает снижение аварийных ситуаций, связанных с прорывом металла под кристаллизатором в несколько раз.

Контрольные вопросы

Назовите основные причины прорыва металла под кристаллизатором.

Охарактеризуйте сущность возникновения прорыва металла под кристаллизатором в результате прилипания корочки к его поверхности и меры его предупреждения.

На чем основан принцип обнаружения момента прорыва корочки в кристаллизаторе?

Опишите сущность работы системы предотвращения прорывов и ее эффективность.

ЛЕКЦИЯ №22

Современные МНЛЗ для разливки сортовой заготовки

В стандартах большинства стран мира под сортовой заготовкой (*billet*) подразумевается квадратная (или близкая к квадрату) заготовка с сечением, как правило, от 100х100 мм до 160х160 мм (встречается также сечение 180х180 мм). Кроме того, к сортовым заготовкам условно относится круглая заготовка диаметром от 100 до 180 мм. Сортовая заготовка обеспечивает существенное технологическое преимущество металлургическому предприятию, поскольку исключает из технологического цикла группу обжимных и крупносортных станов (см. рис.1.3), обеспечивая тем самым существенный энергосберегающий эффект.

Мировое производство сортовой непрерывнолитой заготовки в настоящее время оценивается на уровне 260-280 млн. т в год, и оно постоянно наращивается. Такие МНЛЗ устанавливаются как в конвертерных, так и в электросталеплавильных цехах. Однако, максимальное применение сортовые МНЛЗ нашли, прежде всего, в технологических построениях типа мини-завод.

В Украине высокопроизводительные сортовые МНЛЗ успешно эксплуатируются на ООО «Мини металлургический завод «ИСТИЛ (Украина)», ОАО «Енакиевский металлургический завод», ООО «Электросталь», ОАО «Днепровский металлургический комбинат» (всего 5 машин и 28 ручьев). Производственный потенциал этих МНЛЗ обеспечивает разливку около 5 млн. т стали в год.

В конструкционном плане машины для разливки на сортовые заготовки представляют собой, главным образом, радиальные МНЛЗ, что объясняется их простотой и высокой функциональностью (рис.22.1). Базовый радиус скоростных сортовых МНЛЗ обычно составляет 7-9 м. Зона вторичного охлаждения обычно имеет 4-5 секций, которые оборудованы форсунками для разбрызгивания воды (для последних секций это может быть водовоздушная смесь).

В последнее полтора десятилетия резко обозначилась тенденция использования многоручьевых сортовых МНЛЗ с высокой (до 6-7 м/мин) скоростью разливки, что позволяет получать сортовую заготовку в сталеплавильных цехах с плавильными агрегатами высокой единичной производительности. Современная сортовая МНЛЗ обеспечивает разливку 200-250 тыс.т стали в год или 0,45-0,55 т в минуту на ручей.

Рис.22.1. Схема сортовой МНЛЗ ОАО «ЕМЗ» конструкции ЗАО «НКМЗ»: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промковш; 3 – кристаллизатор; 4 – разливочная дуга и ЗВО; 5 – тянуще – правильный механизм (ТПМ)

Разливка стали с повышенными скоростями обычно обусловливается технологическими ограничениями длительности разливки одного ковша большой емкости (60-80 минут) при фиксированном числе ручьев МНЛЗ. Для многоручьевых сортовых МНЛЗ количество ручьев составляет от 4 до 6. При этом в мире имеется всего несколько десятков МНЛЗ с 7-8 ручьями. Масса металла в промковше обычно составляет 4,5-5 т на один ручей.

Наиболее широкое промышленное распространение для сортовых МНЛЗ получила разливка стали открытой струей (рис.22.2) через стакан-дозатор строго регламентированного диаметра (коррекция уровня металла в кристаллизаторе в

этом случае осуществляется посредством изменения скорости вытяжки заготовки). Открытой струей обычно разливают стали, которые прокатывают затем без строгого контроля макроструктуры на металлопродукцию в виде периодического профиля, уголков, двутавров, проволоки и пр. Сечение таких заготовок обычно не превышает 140-150 мм по стороне квадрата.

Рис.22.2. Схема (слева) и фотография (справа) разливки стали на сортовой МНЛЗ открытой струей: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор

Высокая производительность таких сортовых МНЛЗ достигается за счет высокой скорости вытяжки заготовки (5-6 м/мин) путем применения многоступенчатых (параболических) кристаллизаторов, длина которых составляет 1,0-1,1 м. Гильзы кристаллизаторов современных сортовых МНЛЗ представляют собой высокотехнологичные изделия, которые выполняются с высокой размерной точностью, а на их рабочую поверхность наносится специальное износостойкое покрытие на основе хрома, никеля и др. металлов.

Одной из основных проблем, препятствующих стабильной разливке на сортовых МНЛЗ в течение длительного времени, является износ или зарастание внутренней полости стакана-дозатора. Эта проблема решается путем применения устройства для быстрой замены стакана-дозатора, рассмотренного в лекции 6 (рис.6.4).

Основной стратегией разливки стали открытой струей на сортовых МНЛЗ является стратегия минимизации издержек, которая в натбольшей степени

может быть реализована при разливке длинными и сверхдлинными сериями из одного промковша. В настоящее время достигается разливка 70-100 ковшей стали из одного промковша.

В этом плане важнейшее функциональное значение приобретает работа промковша в процессе разливки и, в частности, стойкость его футеровки рис.22.3).

Рис.22.3. Состояние футеровки промковша до разливки (слева) и и ее износ разливки

Рабочий слой футеровки (толщина 60-80 мм) выполняется путем торкретирования с использованием огнеупорных масс на основе магнезита. Основными зонами износа рабочего слоя футеровки промковша являются область прилегающая к месту падения струи стали, вытекающей из сталеразливочного ковша. Кроме того, повышенный износ футеровки промковша наблюдается, как правило, по всему периметру шлакового пояса, что объясняется химической активностью покровного шлака по отношению к рабочему слою футеровки.

Для снижения негативного воздействия на футеровку и погашения энергии струи, вытекающей из сталеразливочного ковша, используются специальные металлоприемники. При этом функциями металлоприемника являются не только прием и гашение падающей струи металла, но также и направление потоков стали вдоль стенок промковша к дальним ручьям. Это минимизирует износ рабочего слоя и повышает температурную однородность стали в промковше.

Для защиты стали от вторичного окисления между сталеразливочным и промежуточными ковшами обычно устанавливается защитная труба.

Целесообразность использования защитной трубы определяется, в первую очередь, требованиями, которые предъявляются к качеству заготовки.

При этом между промковшом и кристаллизатором струя может быть открытой или защищена специальными приспособлениями (например, герметичным сильфоновым уплотнением, рис.22.4).

Рис.22.4. Разливка стали из промковша в кристаллизатор открытой струей с использованием герметичного сильфона

Более прогрессивной с точки зрения обеспечения высокого уровня качества заготовки представляется схема подачи металла из промковша в кристаллизатор с помощью системы «стопор-моноблок»-«стакан-дозатор»-«погружной стакан». При этом струя стали между промковшом и кристаллизатором защищается посредством специально устанавливаемого погружного стакана.

Однако такая схема приемлема только для сортовой заготовки сечением от 125х125 мм и более, поскольку необходимо обеспечить свободное пространство между погружным стаканом и стенками кристаллизатора. Кроме того использование погружного стакана практически исключает возможность разливки длинными сериями в силу невозможности его замены в результате износа. Поэтому разливка стали закрытой струей на сортовых МНЛЗ применяется в настоящее время в том случае, когда речь идет о качественных низколегированных и легированных сталях.

При разливке с высокими скоростями необходимо также соблюдать определенные требования в отношении режимов качания кристаллизатора (рис.22.5),

что обеспечивает повышение качества поверхности заготовки.

Рис.22.5. Общий вид кристаллизатора сортовой МНЛЗ в сборе

Известно, что неглубокие следы качания возникают тогда, когда кристаллизатор колеблется с высокой частотой и относительно коротким ходом, чтобы дать короткий промежуток времени на отрицательную реакцию проскальзывания. На практике оптимальное значение этого промежутка времени рекомендуется принимать на уровне 0,12-0,15 секунды. При этом величина амплитуды качания кристаллизатора должна находиться в пределах 4-10 мм. В конструкционном плане наибольшее распространение для сортовых МНЛЗ получили механизмы качания с электромеханическим приводом.

Между тем в последнее время отмечается тенденция переоснащения действующих сортовых МНЛЗ высокой производительности механизмами качания с гидроприводом. Это, видимо, объясняется возможностью разливки стали с несинусоидальными режимами качания, которые повышают качество поверхности заготовки и уменьшают вероятность прорывов.

В настоящее время при разливке качественных сталей на высокоскоростных сортовых МНЛЗ широко используются электромагнитные мешалки, которые обеспечивают торможение струи стали, падающей из промковша. Однако применение этого метода воздействия на жидкую сталь следует рассматривать

как довольно дорогостоящее мероприятие, целесообразность использования которого должно определяться технологическими и экономическими соображениями.

Зона вторичного охлаждения сортовых МНЛЗ выполняется из четырех или пяти секций. По меньшей мере, три из этих секций используют водяную систему охлаждения (рис.22.6), а остальные (нижние) могут быть с водовоздушной системой подачи охладителя. Подача охлаждающей воды на поверхность заготовки осуществляется либо форсунками с круглым факелом, либо с овальным.

Рис.22.6. Зона вторичного охлаждения под кристаллизатором (слева) и схема распыления охладителя по овальной форме

Порезка заготовок на мерные длины выполняется либо специальными газовыми резаками, либо на гидроножницах. Более предпочтительной с точки зрения товарного вида заготовки являются газовые резаки, поскольку они не деформируюь профиль заготовки в месте порезки.

Рис.22.7. Порезка сортовой заготовки на машине газовой резки

Далее заготовки охлаждаются на специальном участке, на котором предусматривается обдув заготовок воздухом. Размеры участка должны предусматривать возможность охлаждения всего разливаемого количества заготовок в непрерывном цикле.

Рис.22.7. Перемещение непрерывнолитой заготовки на участке холодильника

Основные технические характеристики современных сортовых МНЛЗ ведущих производителей

Параметр	ЗАО «ММЗ «ИСТИЛ (Украина), Донецк	ОАО «Челябинский металлургический комбинат»	Енакиевский металлургический завод, г.Енакиево	Металлургический комбинат «Северсталь», г.Череповец	Магнитогорский металлургический комбинат, г.Магнитогорск
Производитель оборудования	Danieli (Италия)	Danieli (Италия)	НКМЗ (Украина)	Techint-Rokop	VAI (Австрия)
Год запуска МНЛЗ	1999	2004	2002	2002	2004
Емкость сталеразливочного ковша, т	120	140	145	125	175
Емкость промежуточного ковша, т	28-30	18-23	27-28	40	26-28
Сечение отливаемых заготовок, мм	от 100х100 до 150х150	от 100х100 до 180х180	от 100х100 до 150х150	от 100х100 до 150х150	100х100 до 152х170
Длина заготовок, мм	6000-12000	6000-12000	6000-12000	6000-12000	3500-12000
Скорость разливки, м/мин	2,8-5,5	3,0-6,0	2,5-5,0	3-6	3,0-5,6
Радиус машины, м	8		7	10	9
Количество ручьев, шт.	6	6	6	6	5
Конструкция кристаллизатора	Гильзовый, многоконусный	Гильзовый, многоконусный	Гильзовый, многоконусный	Гильзовый, многоконусный	Гильзовый, многоконусный
Зона вторичного охлаждения	Водяное, четыре секции	Водяное, четыре секции	Водяное, четыре секции	Водяное, пять секций	Водовоздушное, четыре секции
Порезка заготовок на мерные длины	Машины газовой резки	Машины газовой резки	Гидроножницы	Машины газо резки	Машины газовой резки
Годовой объем производства, млн. т	0,8	1,1	1,2	1,2	1,0

Приложение К ТИ 234-СТ.ЭС.МНЛЗ-17-2001	Технологическая карта № 87	Срок действия с24.12.03г.

Марка стали по контракту (спецификации)	Марка стали (обозначение в системе R/3)
5SP	5SP (093001360100)
Тип заготовки:	квадратная 125х125 мм длиной 11800 мм
Допуски в заготовке	согласно ТУ 14-97-161-99 по стороне квадрата: +/-3,0 мм; по длине: ±100 мм; кривизна: 7 мм на 1 м длины, но не более 50 мм на всю длину заготовки, исключая торцевые участки длиной 150 мм; кручение: не более 1,0 градуса на метр, исключая торцевые участки длиной 150 мм, но не более 8 градусов на всю длину заготовки; ромбичность: не более 6,5 мм; радиус закругления углов: не более 10,0 мм.
Требования к заготовке в соответствии:	Спецификация №25 к Контракту №500266 от 23.05.2003 г.

Химический состав стали 5SP, % (масс.)

		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	N_2
Требование НД	Min	0,28	0,50	0,15						-			
	Max	0,37	0,80	0,30	0,040	0,040	0,29	0,29	0,30	-	-	-	-
Рекомендуемый состав	Min	0,28	0,70	0,15						-			
	Max	0,37	0,75	0,23	0,020	0,020	0,29	0,29	0,30	0.007			
Цель		0,35	0,70	0,20	0,020	0,020				0,006	-	-	-

Примечания по химическому составу: Ni+Cr+Cu – max 0,60%; Mn/Si>3, Mn/S>30

Температура ликвидус:	1497 °С		
Выплавка в соответствии :	ТИ 234-Ст.ЭС-02-2002		
Температура выпуска из ДСП	ДСП-2 "Данарк"		
	1600-1620		
Расход алюминия на выпуске из ДСП, кг/т	"С"выпуска, %(масс.)		
	до 0,04 вкл.	0,05-0,08	0,09 и более
	0,85	0,6	0,4
Обработка на печи-ковше в соответствии:	ТИ 234-Ст.ЭС-02-2002		
Температура металла в стальковше перед разливкой, °С	Первый ковш в серии	Второй и последующие ковши в серии	
	1540-1550	1537-1547	
Температура металла в промковше, °С	1514-1522		
Непрерывная разливка стали в соответствии:	ТИ 234-Ст.ЭС.МНЛЗ-17-2001г., Практика разливки №КВ-125-ОС-16, 17 ревизия 2		
Обработка и отгрузка заготовок в соответствии:	ТИ 234-Ст.ЭС.МНЛЗ-18-2001г. Маркировка: несмываемой краской на боковой поверхности каждой заготовки (ближе к торцу) указывается номер плавки, на один торец заготовки наносится цветная маркировка несмываемой краской.		

Восьми ручьевая сортовая МНЛЗ (зона тянуще правильной клети)

ЛЕКЦИЯ №23

Современные технологические построения цехов с высокопроизводительными МНЛЗ для разливки сортовой заготовки

В последние два десятилетия непрерывная разливка стали на сортовую заготовку быстро прогрессирует как в качественном, так и в количественном плане. Это объясняется, главным образом двумя факторами. С одной стороны, разливка стали на сортовую заготовку существенным образом снижает проявление осевой ликвации в сравнении с блюмовой заготовкой и тем более со слитком. С другой стороны прямое получение сортовой заготовки обеспечивает существенный энергосберегающий эффект вследствие исключения целого ряда технологических операций, в том числе и нагревов заготовок перед прокаткой.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ	
БЛЮМ	**СОРТОВАЯ ЗАГОТОВКА**
Относительно простая доводка стали в ковше	Комплексная внепечная обработка металла
Непрерывная разливка на блюмовой МНЛЗ	Непрерывная разливка на высокоскоростной сортовой МНЛЗ
Контроль качества поверхности	
Удаление поверхностных дефектов (обдирка, зачистка и т.п.)	
Нагрев перед прокаткой	
Прокатка до сечения сортовой заготовки	
Охлаждение заготовки	
Контроль качества поверхности	
Удаление поверхностных дефектов (зачистка и т.п.)	
Нагрев перед прокаткой	Нагрев перед прокаткой
Прокатка до готовой продукции	Прокатка до готовой продукции
Окончательный контроль качества продукции	Окончательный контроль качества продукции
Маркировка, упаковка, отгрузка	Маркировка, упаковка, отгрузка

Развитию и тотальному применению метода непрерывной разливки сортовой заготовки способствовали следующие достижения:

-повышение производительности МНЛЗ до уровня блюмовых за счет увеличения числа ручьев (до 6-8) при повышении скорости вытяжки заготовки до 6-7 м/мин;

-кардинальное повышение качества непрерывнолитой заготовки за счет автоматизации процесса разливки и оптимизации эксплуатационных показателей расходуемых и огнеупорных материалов;

-создание и конструктивное оформление концепции универсальных высокоэффективных технологических модулей (мини заводов), объединяющих высокопроизводительный плавильный агрегат (мощную дуговую сталеплавильную печь), агрегат для комплексной доводки стали в ковше («печь-ковш») и высокопроизводительную многоручьевую МНЛЗ;

-повышение выхода годного за счет снижения отходов стали при отрезании головной и концевой частей непрерывнолитой сортовой заготовки, а также уменьшения отходов металла с остатком в прромковше, выводимом из эксплуатации;

-освоение технологии непрерывной разливки сортовой заготовки с использованием защиты стали от вторичного окисления и электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе.

В настоящее время в группе производителей длинномерной продукции наблюдается как бы «смесь» из гибких металлургических предприятий сравнительно небольшого годового объема производства (мини и микро металлургических заводов) и крупных производств на интегрированных металлургических заводах.

Большаяя часть непрерывнолитой сортовой заготовки производится на мини металлургических заводах, которые в силу их концептуального построения являются сравнительно гибкими технологическими системами, обеспечивающими низкие удельные расходы энергии и труда, а также минимальные капитальные вложения.

Обычно мини металлургический завод представляет собой высокопроизводительный технологический комплекс, состоящий из следующих агрегатов: электродуговая печь, установка доводки стали в ковше, вакуумная станция (при необходимости), машина непрерывной разливки стали и группа прокатных станов рис.23.1).

Рис.23.1. Схема современного мини металлургического завода для производства сортового проката

Очень важным преимуществом мини металлургических заводов является широкий спектр объема производства заготовки (от нескольких десятков тысяч тонн заготовки в год до 1 млн. т и более).

В практике металлургического производства известно большое количество крупных мини-заводов с годовым объемом производством 0,8-1,0 млн. т заго-

товки и более. Такие заводы оснащены, как правило, 5-6 ручьевыми сортовыми МНЛЗ.

Примером такого построения является ЗАО «Мини металлургический завод «ИСТИЛ» (Украина)», в состав которого входит высокомощная ДСП емкостью 120 т (введена в эксплуатацию в 2000 г.), установка ковш-печь (пущена в эксплуатацию в 1999 г.), вакууматор VD/VOD (пущен в эксплуатацию в 2001 г.) и шестиручьевая сортовая МНЛЗ (производительность 1 млн т/год). Сталь разливают открытой и закрытой струей на квадратную заготовку со стороной 100,120,125,150 мм и круглую трубную заготовку диаметром 120,130,150,180 мм.

Рис.23.2. Сортовая МНЛЗ ЗАО «ММЗ «ИСТИЛ (Украина)»

Такое технологическое оформление ЭСПЦ позволило значительно повысить конкурентоспособность продукции предприятия и впервые для украинских производителей сертифицировать сортовую заготовку в международном бюро «TUV-NORD» на соответствие требованиям международным стандартам ИСО 9002.

Еще большее распространение в мире получили мини-заводы с годовым объемом примерно 200-500 тыс. т стали в год. Такие заводы работают со стратегией минимизации издержек, что предполагает максимальную простоту технологического процесса. Как правило, на таких заводах устанавливаются 2-4 ручьевые сортовые МНЛЗ, которые в конструкционном плане ничем не отличаются от базовых проектов фирм-производителей. Примером такого построения является недавно запущенный эксплуатацию мини-завод ООО «Электросталь» (г.Курахово), в состав которого входит одна ДСП-50, установка «ковш-печь» 3-х ручьевая сортовая МНЛЗ (сечение заготовки 125х125 мм).

Мини-заводы такого типа построены в различных районах европейской части России (г.Фролово, Волгоградская область; г.Новороссийск, Краснодарский край; г.Ярцево, Смоленская область и пр.).

Еще большее количество мини-заводов имеет объем годового производства на уровне 60-180 тыс. т в год. Обычно такие микро-заводы ориентированы на экономические возможности какого-либо региона (сбор металлолома, строительный потенциал). При этом в состав такого завода обязательно входит прокатная группа, обеспечивающая получение строительных профилей.

Рис.23.3.Склад сортовой заготовки (разложена по плавкам) на микро-заводе в г.Сплит (Хорватия)

Как правило, такие заводы используют 1-2-х ручьевые сортовые МНЛЗ с радиусом машины 5-6 м. Небольшая масса плавки позволяет обеспечивать производство продукции малыми партиями. Такие заводы могут работать в двухсменном режиме или по пятидневной неделе с двумя выходными.

Совершенно другим, но весьма эффективным технологическим построением для производства сортовой заготовки является ее получение в конвертерных цехах интегрированных металлургических заводов. Само по себе производство сортовой заготовки по схеме «доменная печь - конвертер - установка для внепечной доводки стали - сортовая высокопроизводительная МНЛЗ» является весьма привлекательным, поскольку обеспечивает получение сортовой заготовки высокого качества за счет чистоты первичного металлического сырья (в сравнении с мини заводами). Характерной особенностью таких построений является большой объем выплавляемой стали с высокой частотой подачи ковшей на разливку в ритме 35-45 минут между ковшами от одного конвертера. С другой стороны большая единичная мощность конвертеров требует увеличения количества ручьев в одной МНЛЗ до 6-8 и достаточно больших площадей

Рис.23.4. Восьми ручьевая сортовая МНЛЗ (зона тянуще правильной клети)

Примером такого построения является конвертерный цех ОАО «Енакиевский металлургический завод», первая очередь реконструкции которого завершена в 2004 г. В состав цеха входят 3 конвертера вместимостью 160 т каждый, две установки ковш-печь, две высокопроизводительные сортовых МНЛЗ (производительность 1 млн. т/год каждая). Сталь разливают в квадратную заготовку со стороной 100,125,150 мм. В 2007 г. на ОАО «Енакиевский металлургический завод» получено около 2,3 млн. т непрерывнолитой заготовки.

Рис.23.5. Передача заготовок на холодильнике сортовой МНЛЗ Енакиевского металлургического завода

VAI
POMINI
19

ЛЕКЦИЯ №24
Современные МНЛЗ для разливки сляба

В настоящее время более 60% разливаемых на МНЛЗ заготовок являются слябами, то есть плитами в которых отношение ширины заготовки к ее толщине составляет 4-5 и более единиц. Как правило, толщина сляба колеблется в пределах 180-320 мм. Максимально известная толщина сляба, известная на сегодня, составляет 400 мм и достигается на МНЛЗ вертикально типа. Для МНЛЗ криволинейного типа максимальная толщина сляба предусмотрена на заводе «Voestalpine Stahl» (Линц, Австрия). При этом максимальная скорость разливки составляет 0,7 м/мин для трубных марок сталей (базовый радиус 10 м). Сляб максимальной ширины (3250 мм) разливают на китайском заводе «Anyang Iron & Steel». Машина имеет следующие характеристики: толщина сляба – 150 мм; максимальная скорость разливки – 2 м/мин, производительность – 1,1 млн. т в год, масса металла в ковше – 120-150 т, базовый радиус – 6,77 м; металлургическая длина – 18,7 м.

Между тем выбор толщины и ширины разливаемого сляба во многом определяется возможностями прокатных станов и профилем и назначением конечной продукции. Безусловно, наиболее толстые слябы предусматриваются для прокатки толстых листов, предназначенных для получения сварных труб большого диаметра, используемых для транспортировки газа. Наиболее крупным потребителем листовой продукции является автомобильная промышленность.

Основными производителями непрерывнолитых слябов в мире являются КНР, Япония, США, Германия, Россия и Корея. При этом в мире насчитывается боле 650 слябовых МНЛЗ с общим числом ручьев свыше 900 штук. Основными производителями слябовых МНЛЗ в мире являются фирмы Siemens-VAI и SMS-Demag, имеющие, как видно из таблицы весьма похожие, концепции.

Для современных слябовых МНЛЗ характерно обеспечение высокой производительности при условии обеспечения требуемого качества заготовки в совокупности с обеспечением рационального геометрического сечения. В настоящее время слябовые МНЛЗ обеспечивают, как правило, разливку 1,3-1,5 млн. т стали

в год на один ручей, что позволяет совместить работу МНЛЗ с высокопроизводительными конвертерами большой единичной мощности. При этом ширина сляба может варьироваться в диапазоне 0,8-2,2 м, а толщина – 180-300 мм.

Рис.24.1. Общий вид слябой МНЛЗ

Основные характерные черты современных слябовых МНЛЗ заключаются в следующем:

- конструктивно основная рабочая ось МНЛЗ выполняется криволинейной;
- кристаллизатор МНЛЗ выполнен вертикальным и имеет длину 0,8-1,0 м, что обеспечивает улучшение условий флотации неметаллических включений (рис.24.2);
- под кристаллизатором предусматривается вертикальный участок ЗВО длиной 1,5-2,5 м;
- после окончания вертикального участка предусматривается секция многоточечного (непрерывного) загиба заготовки до базового радиуса (количество точек загиба колеблется в пределах 4-8);
- механизм качания кристаллизатора выполняется с гидравлическим приводом, позволяющим обеспечить свободный выбор амплитуды и частоты колебаний в процессе разливки и корректировать эти параметры при изменении скорости вытяжки заготовки (например, амплитуда качаний увеличивается, а частота кача-

ний уменьшается по мере увеличения скорости разливки) с целью минимизирования следов качания и расхода ШОС;

а	*б*	*в*	*г*	*д*
Рис.24.2. Схема движения потоков в МНЛЗ с вертикальным (*а*) и радиальным кристаллизатором (*б*)		**Рис.24.3.Схема загиба заготовки в одной точке (*в*), многоточечный загиб (*г*) и непрерывный загиб (*д*)**		

- конструкция кристаллизатора предусматривает возможность изменения ширины сляба непосредственно в процессе разливки;
- с учетом возрастающих требований к качеству сляба и скорости разливки производители стремятся уменьшить диаметр поддерживающих роликов (в верхних секциях до 100-120 мм) путем специальных решений (дополнительных опор), предупреждающих их прогиб (рис.24.4);
- величина базового радиуса составляет, как правило, 6-10 м и выбирается в зависимости от толщины сляба, скорости разливки и требований к качеству сляба; для слябов толщиной 200-250 мм и более в настоящее время базовый радиус составляет, как правило, не менее 10 м;
- зона вторичного охлаждения разбивается на 10-15 секций и охлаждение осуществляется путем применения форсунок для водовоздушного распыления (за исключением зоны подбоя); при этом особое внимание уделяется равномерности распыления хладагента и перекрытия полей форсунок.

Рис.24.4. Сравнение величины выпучивания заготовки для различных диаметров роликов

Рис.24.5. Конструкция поддерживающих секций с роликами с дополнительными опорами

Рис.24.6. Схема расположения форсунок по ширине сляба в ЗВО

- разгиб заготовки (рис.24.7) осуществляется в специальных секциях по многоточечной (непрерывной) схеме (количество точек разгиба находится в пределеах 4-10), что обеспечивает минимизацию напряжений на межфазной границе;
- практически обязательным элементом конструкции слябовой МНЛЗ является операция «мягкого» обжатия, которая осуществляется на участке ЗВО в зоне, где доля твердой фазы достигает величины 0,5-0,7 (величина обжатия составляет несколько миллиметров); цель динамического мягкого обжатия заключается в том, чтобы предотвратить затратоемкое снижение качества, поэтому в течение всего процесса разливки зона мягкого обжатия регулируется таким образом, чтобы ее положение соответствовало положению окончания затвердевания;

Рис.24.7. Схема разгиба заготовки в одной точке, многоточечный загиб и непрерывный загиб (сверху вниз)	**Рис.24.8. Схема мягкого обжатия сляба**

- при разливке стали обязательно предусматривается система автоматического контроля уровня металла в кристаллизаторе, система автоматического предотвращения прорывов, а также система динамического сопровождения процесса охлаждения заготовки;
- разливка на слябовых МНЛЗ предусматривает максимальную защиту стали от вторичного окисления посредством использования изостатических огнеупоров (защитная труба, стопор-моноблок, стакан-дозатор и погружной стакан);
- при разливке слябов, к которым предъявляются требования повышенного качества, предусматривается применение электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе или ЗВО

Рис.24.9. Разливка сляба с применением погружного стакана	**Рис.24.10. Установка ЭМП в ЗВО**

В результате применения вышеперечисленных технических и технологических решений достигается существенное повышение производительности машины (1,3-1,5 млн. т стали в год на один ручей), улучшение качества заготовки и снижение удельных затрат на строительство МНЛЗ.

Параметр	Алчевский металлургический комбинат	Металлургический комбинат им. Ильича	Krupp Mannesmann, Дуйсбург, Германия	Металлургический комбинат «Азовсталь»	Металлургический комбинат «Азовсталь»
Производитель оборудования	Siemens-VAI	VAI-Siemens	SMS-Demag	Danieli	НКМЗ
Год запуска МНЛЗ	2004	2005	2001	2008	2005
Емкость сталеразливочного ковша, т	300	150	280	330	330
Емкость промежуточного ковша, т	60	26	65	55	50
Толщина сляба, мм	200-250	150-200	260	220-270	220-300
Ширина сляба, мм	1000-1800	1100-2000	850-2100	950-2000	1250-2000
Скорость разливки, м/мин	Max 1,9	Max 1,5	Max 1,5	Max 1,5	1,5
Конструкция кристаллизатора	Вертикальный	Вертикальный	Вертикальный	Вертикальный	Радиальный/ вертикальный
Привод механизма качания	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический
Характер качания	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный
Радиус МНЛЗ, м	10	8	9,125	9,5	10
Количество ручьев, шт.	2	1	2	2	2
Металлургическая длина, м	32		36,4	29,5	32/37
Годовой объем производства, млн. т	2,5	1,1	3,0	2,5	1,4/2,5

Рис.24.11. Общий вид сляба на выходе из МНЛЗ (после порезки)

ЛЕКЦИЯ №25
МНЛЗ для разливки тонких слябов и литейно-прокатные модули

С начала 90-х годов прошлого века в практику создания эффективных технологических систем прочно вошло понятие литейно-прокатный модуль (ЛПМ), в котором органично совмещается процесс разливки стали на заготовку и ее последующая горячая прокатка. В настоящее время в мире насчитывается свыше 30 цехов с ЛПМ, которые производят более 50 млн. т листа в год. Основная доля таких мини заводов приходится на США (около 40%), Западную Европу (более 20%) и развивающиеся (включая КНР) страны (27%).

В целом такая схема может быть представлена следующим образом: выплавка стали в дуговой печи или конвертере → доводка стали на установке «ковш-печь» → разливка стали (толщина сляба 50-70 мм) и его горячая прокатка прокатка на ЛПМ → прокатка на станах холодной прокатки (рис.25.1). При этом для получения 1 тонны холоднокатаного листа достаточно 1,10-1,12 тонны жидкой стали, а значительный энерго- и ресурсосберегающий эффект достигается, главным образом, за счет сокращения технологической цепочки и исключения дополнительных циклов охлаждения и нагрева заготовки.

Рис.25.1.Схема расположения основных функциональных единиц ЛПМ

Принято считать, что первый промышленный ЛПМ был пущен в 1989 г. в г. Крофордсвилле (США): компания «*Nucor*» ввела в эксплуатацию завод, оснащенный электродуговыми печами и МНЛЗ для получения сляба толщиной 50 мм. При этом слябы передавались непосредственно на стан горячей прокатки. Этот процесс получил название CSP (*Compact Strip Production*), а разработка предложена фирмой «Schloeman-Siamag» (Германия).

Основной технической и технологической задачей, решение которой обеспечило распространение ЛПМ в мире, является достижение высокого показателя расхода стали на участке разливки при небольшой толщине получаемого сляба, что позволило осуществлять высокоэффективную прокатку листа практически в едином технологическом потоке. Для этого понадобилось обеспечить разливку тонкого сляба со скоростью 5-10 м/мин.

Рис.25.2. Общая схема МНЛЗ для разливки тонких слябов

Основные решения, обеспечивающие высокую эффективность технологии CSP, заключаются в следующем.

1.Сокращение до минимума числа промежуточных этапов технологического процесса обжатия сляба (исключение промежуточных этапов охлаждения и нагрева заготовки и т.п.). Это обеспечивает существенное уменьшение энергетических затрат (рис.25.3).

Рис.25.3. Потребление энергии (МДж/т) при производстве тонкого листа по различным технологическим схемам:
1 – при разливке стали в слитки с последующей прокаткой;
2 – при разливке стали на слябовой МНЛЗ с охлаждением слитков до нормальной температуры и с последующей прокаткой;
3 - при разливке стали на слябовой МНЛЗ и передачей слябов горячими для последующей прокатки;
4 – при разливке стали на тонкослябовой МНЛЗ (ЛПМ);
5 – при разливке стали непосредственно на тонкий лист на двухвалковой МНЛЗ и холодной прокатке.

2.Создание системы технических решений, обеспечивающих разливку с высокими скоростями на тонкий сляб. Основной проблемой при этом является подвод жидкой стали в вертикальный кристаллизатор (рис.25.4 и рис.25.5) и ее равномерное распределение по сечению. С этой целью внутренней полости кристаллизатора в верхней части придается воронкообразная форма, обеспечивающая позиционирование в ней погружного стакана. Поскольку скорость вытяжки сляба в таких МНЛЗ составляет 5-10 м/мин, необходимо обеспечивать подвод металла с большим удельным расходом.

Рис.25.4.Схема подачи стали в кристаллизатор тонкослябовой МНЛЗ

Рис.25.5. Фотография головной части кристаллизатора тонкослябовой МНЛЗ

3.Разработка ведущими производителями изостатических огнеупоров специальных конструкторских решений для нижней части погружных стаканов. Существо этих решений сводится к обеспечению подачи металла в кристаллизатор плоскими струями (рис.25.6). Такая конфигурация погружных стаканов получила название «бобровый хвост».

Рис.25.6. Конструкция прямоточного (слева) и глуходонного (справа) погружных стаканов для разливки на тонкослябовой МНЛЗ

4.Применение системы электромагнитного торможения потока металла, подаваемого в кристаллизатор. Электромагнитный тормоз создает в верхней части кристаллизатора регулируемое по напряжению электромагнитное поле. Втекающая сталь пересекает это поле и в ней наводятся напряжения и токи, которые закорачиваются в жидкой стали. Эти индуцированные силы тормозят потоки стали и обеспечивают равномерно распределенное стекание металла в нижние горизонты.

5.Реализация технологии разливки сляба с дополнительным механическим обжатием заготовки с жидкой сердцевиной непосредственно под кристаллизатором (до толщины 35-40 мм). Меньшая толщина сляба позволяет с большей легкостью прокатывать его в тонкий лист.

6.Установка устройства для удаления окалины с поверхности сляба перед ножницами для порезки заготовки на мерные длины. Это исключает образование поверхностных дефектов листа при последующей прокатке.

7.Использование туннельной печи для выравнивающего подогрева заготовки (непосредственно после порезки и без дополнительного охлаждения). Длительность пребывания тонкого сляба в печи обеспечивает практически полную равномерность температуры по ширине, толщине и длине сляба. Поэтому следующие операции (прокатку и охлаждение) можно вести при постоянной скорости.

8.Совмещение производительности двух МНЛЗ, производящих тонкий сляб, и одной линии прокатки сляба на тонкий лист (рис.25.7), что повышает производительность ЛПМ до 2,0-2,5 млн. т продукции в год.

9.Прокатка тонкого сляба в группе черновых и чистовых клетей с целью получения проката в рулонах. Для этих целей применяются две различные схемы: система непрерывной прокатки (показана на рисунке) и система прокатки на стане Стеккеля (рис.25.8), то есть листопрокатном реверсивном стане горячей прокатки тонких полос, на входящей и выходящей сторонах которого расположены печные моталки, обеспечивающие прокатку в узком температурном интервале.

Рис.25.7. ЛПМ с двумя МНЛЗ и передачей сляба на прокатку на непрерывный стан

В целом же все ведущие фирмы занимаются разработкой литейно-прокатных агрегатов, обеспечивающих разливку на тонкий или средний сляб, совмещенную с прокаткой на тонкий лист (см. таблицу).

Рис.25.8. Варианты размещения оборудования ЛПА при использовании стана Стеккеля

Параметр	Thyssen Krupp Stahl Bruckhausen, Германия	Выксунский металлургический завод, Россия	Anshan Iron & Steel Group, пр. Лиаонинг, КНР	Arvedi steel plant, Кремона, Италия	Corus IJmuiden Steel Plant, Голландия
Производитель оборудования	SMS-Demag	Danieli	VAI	Mannesmann Demag - Arvedi	Mannesmann Demag -Corus
Год запуска МНЛЗ	1999	2008	2000	1992	2000
Емкость сталеразливочного ковша, т	380	150	95	180	320
Емкость промковша, т	60	26	35	30	75
Толщина сляба, мм	48-63	70-90	100; 135	55-70	70-90
Ширина сляба, мм	900-1600	1100-2000	900-1620	950-1300	750-1560
Длина сляба, м	-	Max 37,5	11,0-15,5	-	-
Скорость разливки, м/мин	Max 6	Max 3,5	Max 3,5	Max 6,5	Max 6,0
Привод механизма качания	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический
Характер качания	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный	несинусоидальный
Радиус МНЛЗ, м	5	5	6,5	5,2	5,2
Количество ручьев, шт.	2	1	1	1	1
Толщина прокатываемого листа, мм	1,0-6,35	2-8	1,0-4,5	1,1-10.0	0,7-2,5
Годовой объем производства, млн. т	2,5	1,2	1,45	1,4	1,3

Так, фирмой «Маннесман Демаг Хюттентехник» разработан процесс ISP, который во многом аналогичен процессу CSP. Тонкий сляб толщиной 60 мм выходит из кристаллизатора с еще жидкой сердцевиной и подвергается на участке опорных роликов мягкому обжатию до толщины 45 мм. Затем после полного затвердевания сляб прокатывается в трехклетьевой группе на полосу толщиной 15-20 мм. После индукционного промежуточного подогрева и прокатки полоса подвергается смотке в рулон. На установке ISP фирмы «Арведи» (Италия) можно получать полосу толщиной 1,1 мм и более.

В 2008 г. в России успешно запущен новый электросталеплавильный комплекс на ОАО «Выксунский металлургический завод», в состав которого входит литейно-прокатный агрегат, разработанный и изготовленный фирмой «Danieli».

Рассматривая переспективы расширения применения литейно-прокатных модулей в мире, следует иметь в виду, что в отличие от традиционных технологических построений с мощными прокатными станами они очень хорошо впи-

сываются в любые построения на базе концепции мини-заводов с объемом производства 0,8-1,0 млн. т стали в год и более. При этом ЛПМ также достаточно хорошо вписываются в работу конвертерных цехов.

В конце XX – начале XXI века на металлургических предприятиях стали появляться опытно-промышленные и промышленные агрегаты для непрерывной разливки стали непосредственно на тонкую полосу. Основное преимущество прямой отливки тонкого листа – исключение из технологической схемы операции горячей прокатки с соответствующим сокращением энерго- и трудозатрат. В агрегатах прямой отливки тонкого листа кристаллизатор состоит из двух валков, расположенных непосредственно под промковшом и вращающихся в противоположных направлениях (рис.25.7).

Рис.25.7. Схема непрерывного литья листа на двухвалковой МНЛЗ

Жидкая сталь при разливке поступает в пространство между валками и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью и выходят из валков в форме листа, толщина которого определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора. Для отвода выделяющегося тепла валки, изготовленные, как правило, из сплава меди с хромом, охлаждаются водой. В качестве покрытия валков используют различные материалы на основе никеля, хрома или керамики.

Технологическая схема получения тонкого листа с применением двухвалковых МНЛЗ имеет огромный потенциал в части экономии энергетических ресурсов (в 8-10 раз), снижения потерь с окалиной (в 40-50 раз), повышения производительности работы персонала (5-10 раз), снижения выбросов парникового газа (в 10-20 раз) при существенном снижении затрат на капитальное строительство.

Обобщая известные исследования по созданию промышленных образцов двухвалковых МНЛЗ, следует отметить, что главным объектом внимания является качество получаемой продукции. Это относится, прежде всего, к качеству поверхности получаемого листа и наличия в нем трещин. Наиболее вероятные источники трещин в процессе разливки на двухвалковой МНЛЗ, видимо, следует связывать с механизмом формирования разливаемого листа (рис.25.8 и рис.25.9).

Рис.25.8..Схема формирования заготовки на двухвалковой МНЛЗ

Рис.25.9. Схематическое представление процесса затвердевания твердой корочки стали на валке

Поскольку в начале процесса формирования твердой фазы на вращающихся барабанах образуются две раздельные корочки, то в месте их соединения металл начинает испытывать значительные нагрузки. При этом в точке соединения этих корочек металл начинает испытывать внутренние напряжения, а теплопередача валкам увеличивается, что дополнительно способствует развитию термических напряжений. Фактически на этом же участке возникает также эффект «прокатки» листа, который порождает дополнительные напряжения и деформации. После выхода заготовки из валков продолжается ее охлаждение, сопряженное с повышением внутренних напряжений.

Крайне важным для обеспечения технологии литья тонкой полосы оказывается также вопрос поддержания кромок жидкой лунки (с торцов валков). Эта проблема связана с тем фактом, что застывание в большей степени происходит именно в этой области из-за потери тепла как через материал ограждения в боковой части, так и через валки. Преждевременное застывание может привести к низкому качеству кромки, инициируя цепь явлений, приводящих к остановке МНЛЗ. Для обеспечения требуемых кондиций литья, видимо, необходимо использование специальных керамических материалов в совокупности со специальной системой подачи металла в направлении этих кромок.

В январе 2000 г. было объявлено о подписании соглашения между американской фирмой «Nucor», австралийской фирмой BHP и японской фирмой IHI о создании совместного проекта *Castrip*. Согласно проекта базовая установка для литья тонкого листа установлена и функционирует на металлургическом заводе фирмы «Nucor» в Кроуфордсвилле (США).

Основные характеристики проекта:

размеры цеха, м	155x135
масса плавки, т	110
диаметр валков МНЛЗ, мм	500
скорость разливки, м/мин	80 (номинал) -150 (максимально)
толщина отливаемой заготовки, мм	0,7-2,0

ширина заготовки, мм	2000 (максимально)
масса рулона, т	25
клеть в линии процесса	одна четырехвалковая с гидравлическим регулированием толщины
размеры рабочих валков, мм	475x2050
размеры опорных валков, мм	1550x2050
размеры рулона	2x40 т
годовая производительность, тыс. т/год	500

В конце 2000 г. германская фирма *SMS Demag AG* и швейцарская фирма *MAIN AG/Marti-Technologie AG* подписали лицензионное соглашение о строительстве промышленной двухвалковой установки по отливке тонкого листа из углеродистых и нержавеющих сталей производительностью 300-800 тыс. т в год. Установка оборудована оригинальным устройством боковых стенок кристаллизатора, позволяющим изменять ширину отливаемого листа. Весь процесс происходит в инертной атмосфере. Скорость разливки составляет 40-100 м/мин при толщине листа 1,9-3,1 мм (сталь StW22) и 2,3-3,7 мм (сталь AISI 304). Ширина полосы – 1360 мм.

В целом же технология прямой отливки тонкого листа на двухвалковой МНЛЗ исключает такие операции традиционного процесса, как качание кристаллизатора, приводящее к образованию «следов» на поверхности, зачистку полупродукта и его повторный нагрев и прокатку. В результате этого значительно сокращаются капитальные вложения, связанные с оборудованием, и уменьшаются энергозатраты (на 85%, по сравнению с традиционной технологией).

ЛЕКЦИЯ №26
МНЛЗ для разливки блюмов

Традиционно производство блюмовой непрерывнолитой заготовки предполагало, что она будет использована для получения длинномерного проката, а также для получения поковок, используемых затем в различных отраслях машиностроения. Соответственно блюмовые МНЛЗ могут существенно отличаться по требованиям, предъявляемым к качеству продукции и производительности машины, а, следовательно, и сечению заготовки.

Обычно на блюмовых МНЛЗ обеспечивают получение заготовки прямоугольного или квадратного сечения с минимальным размером стороны свыше 200 мм. Соотношение между сторонами, как правило, не превышает 1:1,5. Кроме того, с определенной степенью условности по основным конструктивным признакам к блюмовым МНЛЗ можно отнести машины для получения круглой заготовки и фасонных балок.

Мировое производство крупных и средних заготовок прямоугольного, квадратного, круглого и фасонного (балки) сечений оценивается на уровне 210-220 млн.т в год. По состоянию на начало 2008г. в мире насчитывалось примерно 330-340 блюмовых МНЛЗ, около 50 машин для разливки крупной фасонной заготовки и порядка 100 машин для получения круглой заготовки. При строительстве новых блюмовых МНЛЗ все большее внимание уделяется комбинированным МНЛЗ, обеспечивающим разливку, по меньшей мере, нескольких прямоугольных сечений, а также круга или фасонного профиля.

Средняя производительность одного ручья для блюмовой МНЛЗ составляет примерно 125-130 тыс.т стали в год. Рекордные показатели производительности одного ручья на лучших блюмовых МНЛЗ мира значительно выше. Например, на японских металлургических заводах «Сумитомо Метал» (размер блюма 300х400 мм) и «Даидо Стил» (размер блюма 370х480 мм) она составляет 300 тыс.т стали в год, а на австралийском заводе «БХР Стил» (размер блюма 400х630 мм) – 400 тыс.т стали в год. Вместе с тем, как показывает анализ работы современных МНЛЗ, далеко не все производители стали стремятся к максимальной

скорости разливки. На рис.26.1. оценочные зависимости величины возможной скорости вытяжки заготовки в зависимости от ее сечения.

Рис.26.1. Скорость вытяжки заготовки (максимальная и средняя) на современных МНЛЗ в зависимости от сечения

Учитывая высокие требования машиностроителей, многие металлургические предприятия акцентируют внимание на качестве блюмовой заготовки.

Современные блюмовые МНЛЗ можно условно классифицировать по следующим признакам:

- по назначению (для разливки рядовых и качественных сталей общего назначения, для разливки высококачественных сталей, для разливки сталей специального назначения);
- по конструкции (вертикальная, вертикальная с загибом после затвердевания, радиальная, криволинейная);
- по сечению заготовки (квадрат или прямоугольник сечением 200-280 мм; блюм большого сечения с минимальным размером стороны 300 мм; круглая заготовка диаметром более 200 мм, фасонная заготовка типа «собачья кость»);
- по числу ручьев (одноручьевые, двухручьевые и многоручьевые – 3-6 ручьев).

Для разливки рядовых и качественных сталей общего назначения используются, как правило, блюмовые МНЛЗ радиального и криволинейного типа.

Для МНЛЗ этого класса характерно наличие возможности получения заготовок нескольких сечений. Причем сечение заготовки определяется главным образом требованиями сопряженных прокатных цехов. Обычно к таким блюмовым МНЛЗ предъявляется условие обеспечения высокой производительности. Для выполнения этой задачи в практике многих металлургических заводов мира применяются многоручьевые машины. Основная часть блюмовых МНЛЗ имеет 2-4 ручья. На долю 6-ручьевых машин приходится около 1/5 от всего количества блюмовых ручьев МНЛЗ и они расположены в крупных конвертерных цехах с большой единичной емкостью плавильных агрегатов.

Дать описание блюмовой МНЛЗ (Оскол или Нижний Тагил)

Для разливки высококачественных сталей используются МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным кристаллизатором, а также вертикального типа с загибом твердой заготовки. Чисто вертикальных блюмовых МНЛЗ в мире работает достаточно мало; бóльшее распространение получили машины с вертикальным кристаллизатором и многоточечным загибом и разгибом заготовки. Как правило, это одно-, двух- или четырехручьевые МНЛЗ, которые расположены в электросталеплавильных цехах, оснащенных вакуумными станциями и агрегатами «ковш-печь». На таких МНЛЗ разливают высоколегированные и нержавеющие стали, а также стали с особыми свойствами. Скорость вытягивания заготовки при этом оказывается достаточно низкой – 0,35-0,50 м/мин.

Перспективным направлением при производстве широкополочных балок является использование ***способа непрерывной разливки для получения фасонной заготовки,*** что позволяет существенно снизить себестоимость готового проката. Концепция таких МНЛЗ предполагает обеспечение конкурентного преимущества за счет энергосберегающего эффекта, который базируется на приближении профиля заготовки к сечению конечной продукции. При этом сечение непрерывнолитой заготовки в максимальной степени адаптируется к тем прокатным станам, которыми располагает конкретный металлургический завод или компания (рис.26.2 и рис.26.3).

Непрерывная разливка фасонных заготовок получила широкое распространение в мире. Большинство МНЛЗ для производства балочных фасонных заготовок находится на металлургических заводах США, Японии и Южной Кореи. Общее количество таких МНЛЗ приближается к 60. Длина балки заготовки варьируется в значительных пределах: от 200 до 1100 мм.

Рис.26.2. Схема МНЛЗ для разливки фасонной заготовки	**Рис.26.3.Расположение кристаллизаторов для разливки фасонной заготовки на 6-ти ручьевой МНЛЗ**

К основным преимуществам разливки балочных фасонных заготовок относятся:

- экономия производственных расходов для нового балочного стана до 25-30% (исключение черновой клети);
- повышение производительности на 15% (за счет исключения черновой клети и связанных с ней черновых проходов);
- снижение потребности в электроэнергии на 50% (за счет уменьшения числа обжатий);
- повышение выхода годного на 1,0-1,5%.

В основном эти МНЛЗ расположены в электросталеплавильных цехах, большая часть из которых работает с использованием шихты прямого восста-

новления. Практически все МНЛЗ для производства балочных фасонных заготовок в конструкционном плане являются комбинированными, что предполагает разливку на них прямоугольных заготовок.

Рис.26.4. Разливка стали на фасонную заготовку двумя струями (слева) и внешний вид такой заготовки (справа)

Ведущими производителями таких МНЛЗ являются фирмы SMS-Demag и MDM (Германия), а также японские концерны Mitsubishi и Sumitomo.

Дать описание машины в Нижнем Тагиле.

ЛЕКЦИЯ №27
МНЛЗ для производства круглой заготовки

Круглая непрерывнолитая заготовка широко используется в индустриально развитых странах для производства бесшовних труб, железнодорожных колес и бандажей, а также качественного сортового проката. Этому способствовали достижения в области внепечной обработки, обеспечивающие высокий уровень качества жидкой стали, а также дальнейшее усовершенствование процесса непрерывной разливки стали.

Исследованиями, проведенными в ФРГ, США, Японии и бывшем СССР, установлено, что использование круглой литой заготовки по сравнению с применением непрерывнолитых блюмов при производстве труб имеет определенные преимущества. Во-первых, поверхность круглой заготовки имеет более высокое качество, чем квадратной (нет продольных и угловых трещин). Это непосредственно приводит к более высокому качеству труб, изготовленных из круглой непрерывнолитой заготовки (рис.27.1).

Рис.27.1. Общий вид круглой непрерывнолитой заготовки (слева) и бесшовных труб, полученных из них (справа)

Во-вторых, повышенная плотность равноосной структуры в осевой зоне круглых заготовок обеспечивает снижение количества микродефектов. Послед-

ние обычно образуются на внутренней поверхности трубы из-за наличия осевой пористости у квадратных заготовок.

Размерный сортамент литых круглых трубных и колесных заготовок довольно широк: от 150 до 500 мм. Кроме того, на сортовых МНЛЗ открытой струей отливаются заготовки диаметром 100-130 мм.

Непрерывная разливка круглых стальных заготовок осуществляется на МНЛЗ, которые в конструкционном плане близки к традиционным блюмовым МНЛЗ (рис.27.2). Качественные трубные марки сталей разливаются преимущественно на радиальных или криволинейных МНЛЗ с многоточечным загибом и разгибом заготовки, что позволяет получать заготовки диаметром 300-400 мм. Базовый радиус на этих машинах колеблется в пределах 10-14 м в зависимости от максимального диаметра отливаемой заготовки.

Рис.27.2. Схема современной МНЛЗ для разливки круглой заготовки

В целом же МНЛЗ для получения круглой заготовки больше распространены в странах с развитым металлургическим и машиностроительным комплексом, в т.ч. в государствах Восточной Европы. Основными производителями машин для разливки круглых стальных заготовок являются фирмы MDM (Германия), SMS-Demag (Германия) и Danieli (Италия).

Твердый каркас (оболочка) круглого непрерывнолитого слитка является более эластичной и менее подверженной воздействию ферростатического давления и внутренних напряжений в сравнении с непрерывнолитым слитком прямоугольной формы. Это позволяет отливать круглые заготовки диаметром, равным толщине прямоугольного слитка, с более высокой на 20-25% скоростью вытяжки. Вместе с тем площадь поперечного сечения круглого слитка и, следовательно, масса 1 погонного метра на 21,5% меньше площади квадратного слитка со стороной, равной диаметру круглого слитка. Таким образом, производительность ручья при отливке круглой заготовки и квадрата со стороной, равной диаметру, практически одинакова.

Между тем при непрерывном литье круглых заготовок, особенно при разливке на радиальных МНЛЗ, повышается степень неравномерности толщины затвердевающей оболочки слитка в кристаллизаторе, что приводит к образованию овальности поперечного сечения. Развивающаяся овальность является основной причиной возникновения продольных наружных и внутренних трещин (рис.27.3).

Рис.27.3. Фотографии поперечных темплетов непрерывнолитой заготовки диаметром 150 мм с правильной (слева) и с деформированной (справа) геометрической формой (овальностью)

Многочисленными промышленными исследованиями установлено, что для снижения овальности заготовки необходимо, прежде всего, устранение неравномерности теплоотвода в начальный момент затвердевания, то есть в кристалли-

заторе. Особое значение при этом имеет характер подвода струи металла в кристаллизатор, осуществляемый, как правило, через прямоточный погружной стакан, и качество поверхности гильзы (рис.27.4).

Рис.27.4. Общий вид гильз кристаллизаторов, используемых для получения круглой заготовки

В конструкционном плане внутренняя поверхность гильзы выполняется одно- или двухконусной для круглой заготовки большого диаметра и параболической для мелкой круглой заготовки. При этом рабочая поверхность имеет защитное покрытие на основе хрома или никеля.

Для равномерного отвода тепла по периметру заготовки в зоне вторичного охлаждения рекомендуется использовать специальную схему расположения форсунок (рис.27.5.).

В последнее время в мировой практике полностью оформилась тенденция создания комбинированных МНЛЗ, которые позволяют разливать несколько различных сечений блюмов, а также круглых заготовок.

В Украине производство круглой непрерывнолитой заготовки диаметром 100, 125, 150 и 180 мм освоено на сортовой МНЛЗ ЗАО «ММЗ «ИСТИЛ (Украина)».

Рис.27.5. Схема распыления охлаждающей воды по поверхности круглой заготовки

В России технология непрерывного литья круглых заготовок диаметром от 150 до 360 мм полностью освоена на МНЛЗ в электросталеплавильном цехе Волжского трубного завода, который был запущен в эксплуатацию в 1990 г. В этом цехе функционируют три четырехручьевых МНЛЗ (производство итальянской фирмы INNSE). В этих МНЛЗ используется радиальный кристаллизатор с базовым радиусом 14 м и длиной 700 мм, который имеет по четырем сторонам два ряда поддерживающих роликов, жестко скрепленных с кристаллизатором. Ниже кристаллизатора опорных устройств нет: по большому радиусу МНЛЗ расположены направляющие ролики, имеющие универсальный дугообразный калибр для слитков диаметром от 150 до 350 мм, такие же калибры имеют валки в 5-и клетьевой системе вытягивания.

Охлаждение круглого слитка ниже кристаллизатора осуществляется в трех зонах вторичного охлаждения, при этом первая зона, протяженностью 350 мм, располагается в опорно-направляющих роликах кристаллизатора и на нее приходится 35% от общего расхода воды в зоне вторичного охлаждения. Вторая зона имеет протяженность около 2,5 мм и на нее приходится 50% общего расхода воды. Третья зона (15% расхода) имеет протяженность 1500-1700 мм и орошение слитка осуществляется из стояков, расположенных по четырем сторонам. Интенсивность охлаждения в каждой зоне определяется типом и диаметром форсунки и расстоянием от нее до поверхности слитка.

В 2006 г. в России на Северском трубном и Таганрогском металлургичес-

ком заводах были пущены две 5-ти ручьевых МНЛЗ исключительно для получения круга диаметром 150-400 мм. Производитель МНЛЗ – фирма SMS-Demag (Германия).

Рис.27.6. Внешний вид круглой непрерывнолитой заготовки и новой МНЛЗ Таганрогского металлургического завода