

6
А-62

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

ГОРЬКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.А. ЖДАНОВА

Б. А. КОРОТКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНОЙ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ
НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ И КАЧЕСТВО СЛЯБОВ

Специальность 05,323 - Литейное производство

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Горький
1971

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

ГОРЬКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.А. ЖДАНОВА

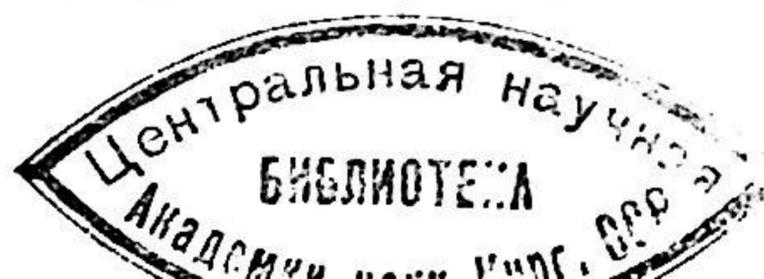
Б.А. КОРОТКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНОЙ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ
НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ И КАЧЕСТВО СЛЯБОВ

Специальность 05,323 - Литейное производство

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Горький
1971



621.74

А62

Работа выполнена в Украинском научно-исследовательском институте металлов и на Руставском металлургическом заводе.

Научные руководители: кандидат технических наук
В.Т. СЛАДКОШТЕЕВ
доктор технических наук
профессор Е.И. АСТРОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор А.Д. АКИМЕНКО
кандидат технических наук
Ю. Д. ДОРОШЕВ

Ведущее предприятие - Горьковский металлургический завод.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1971 г.

Защита диссертации состоится 14 сентября 1971 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней металлургического факультета Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова (г. Горький, Д-24, ул. Минина, 24).

Отзывы в двух экземплярах просьба отправлять в адрес ученого секретаря Совета металлургического факультета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

канд. техн. наук доцент

В.А. СКУДНОВ

Важной проблемой в области непрерывной разливки стали является создание установок радиального типа. Их использование обеспечивает значительное сокращение капитальных затрат, улучшение условий эксплуатации и наиболее благоприятные возможности совмещения непрерывной разливки с прокаткой по сравнению с применяемыми вертикальными установками. Для успешного решения этой проблемы необходимо разработать способ подвода металла в радиальный кристаллизатор, исследовать допустимые скорости разливки и температуру жидкой стали, а также определить режим вторичного охлаждения слитков. Анализ состояния вопроса показал, что по технологии непрерывной разливки стали на установках радиального типа имеются лишь отрывочные и противоречивые сведения.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния технологии радиальной непрерывной разливки стали на затвердевание и качество литых слябов больших сечений.

- В работе поставлены и решены следующие вопросы
- изучение влияния способа подвода струи в кристаллизатор и скорости разливки на гидродинамику жидкой стали;
- исследование влияния скорости разливки, температуры жидкого металла и способа подвода струи на теплоотвод в кристаллизаторе;
- установление влияния технологических параметров на затвердевание и качество слитков;
- разработка и внедрение основных параметров промышленной технологии непрерывной разливки спокойной углеродистой стали в широкие прямоугольные слитки на

установках радиального типа.

Исследования проводились на промышленной установке Руставского металлургического завода и в УКРНИИМЕТе.

Методика проведения исследований

Первая отечественная радиальная установка непрерывной разливки стали состоит из двух машин для отливки слитков сечением 160x900 и 180x900 мм. Сталь из разливочного ковша емкостью 200 т поступает в 10-т промежуточный ковш и далее через один из двух цирконовых стаканов в кристаллизатор. Кристаллизаторы сборные из четырех медных пластин толщиной 65 мм (двух широких радиальных и двух узких плоских), смонтированных в стальном корпусе. В пластинах просверлены каналы для протекания воды. Радиус технологической базовой поверхности кристаллизаторов, проходящий по внутренней стороне вогнутой медной пластины, 8000 мм. Кристаллизаторы высотой 1250 мм расположены на дуге окружности, описывающей технологическую ось установки, таким образом, что расстояние от горизонтальной линии из центра кривизны до мениска жидкой стали составляет 450 мм. В процессе разливки кристаллизаторам сообщается возвратно-поступательное движение по дуге длиной 20 мм с соотношением скоростей движения вниз и вверх 1:3.

Слиток из кристаллизатора поступает в зону вторичного охлаждения, выполненную по тому же радиусу, что и кристаллизатор. Вторичное охлаждение разбито по длине на три участка. На примыкающем к кристаллизатору участке длиной 2200 мм рабочая полость образуется верхним и нижним рядами брусьев по широким сторонам слитка и роликами по узким.

На втором участке длиной 2650 мм установлены ролики диаметром 150 мм, на третьем длиной 4700 мм — ролики диаметром 190 мм с шагом 220 мм. Слиток охлаждается водой, распыляемой форсунками. Вода для охлаждения граней большего и меньшего радиусов подается раздельно. Слиток из кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения вытягивается правильно-тянущим устройством. Скорость вытягивания слитков может изменяться в пределах 0,3-3,0 м/мин.

Сталь выплавляли скрап-рудным процессом на жидком чугуна в 200-т мартеновских печах. Металл раскисляли силикомарганцем (4,5-7,5 кг/т) в печи и силикокальцием (2,5-3,5 кг/т) и алюминием (0,28-0,30 кг/т) в ковше.

Параметры разливки изменяли в следующих пределах: температуру стали в промежуточном ковше от 1530 до 1570°С; скорость разливки от 0,40 до 0,85 м/мин; расход воды на вторичное охлаждение от 0,7 до 1,7 л/кг. Кристаллизатор наполняли струей из промежуточного ковша, горизонтальной и вертикальной струей через затопленный промежуточный стакан. При подводе металла затопленными струями мениск стали в кристаллизаторе защищали шлаком, образующимся при расплавлении экзотермической смеси состава: 8% силикокальция, 14% алюминия, 10% натриевой селитры, 20% железной окалины, 22% силикатной глыбы и 26% плавикового шпата. Общее количество опытных слитков (сечением 180x900 мм) составило 150.

Тепловые потоки определяли по перепаду температуры в двух точках стенки рассматриваемого сечения кристаллизатора. С этой целью в широких медных стенках кристаллизатора были установлены 52 хромель-копелевые термопары на четырех уровнях по высоте и

в различных зонах по ширине. Запись показаний термопар осуществлялась на электронных потенциометрах ЭПП-09.

Исследовали также взаимодействие слитка с широкими стенками кристаллизатора методом электроконтакта. С этой целью в стенках установили 30 электроизолированных металлических контакторов на трех уровнях по высоте и в пяти зонах по ширине. Контактory включали в цепь, состоящую из корпуса кристаллизатора, добавочного сопротивления, сухого элемента напряжением 3 вольта и вибратора осциллографа Н-700. В момент контакта корочки слитка с медной стенкой кристаллизатора в месте установки электроконтактора цепь замыкалась, и на фотобумаге осциллографа фиксировалось отклонение вибратора. Исследования контактирования слитка со стенками кристаллизатора (и теплового потока в кристаллизаторе) проводили при разливке 6 плавок.

Скорость затвердевания радиальных непрерывных слитков исследовали на 8 плавках выливанием жидкой фазы, введением сернистого железа и заливкой свинца, а также металлографическим методом.

Отлитые слитки осматривали по широким и узким граням отдельно. Фиксировали характер, количество и размеры наружных дефектов. Внутренние дефекты слитков изучали на серных отпечатках и травленных в 15%-ном растворе азотной кислоты поперечных и продольных темплетов. Определяли количество трещин (и ликвационных полосок) на каждом темплете (серном отпечатке) и их суммарную длину. На травленных темплетов определяли длину зоны столбчатых дендритов по противоположным широким сторонам слитка и смещение теплового центра. Механические испытания листов, про-

катанных из литых слябов, проводили согласно требованиям соответствующих стандартов.

Гидродинамические процессы в лунке слитка исследовали на лабораторной установке, состоящей из модели промежуточного ковша и лунки слитка, размеры которых определяли по методике Г.П. Иванцова. В качестве моделирующей жидкости использовали воду. Скоростные напоры потоков в различных местах лунки слитка определяли с помощью трубок Пито, подключенных к перевернутому U-образному манометру с воздушным заполнением. Модель лунки слитка сечением 180x900 мм располагали таким образом, что расстояние от горизонтальной линии из центра кривизны до мениска металла в кристаллизаторе было равным 750 мм. Скорость разливки слитка меняли в пределах 0,5-0,9 м/мин. Металл подавали одной и двумя вертикальными струями из промежуточного ковша, смещенными к узким стенкам; затопленной вертикальной струей по центру и смещенной к узкой стенке; одной и двумя затопленными горизонтальными струями.

Влияние способа подвода струи и скорости разливки на гидродинамику жидкой стали

Методом гидравлического моделирования установлено, что при подводе металла вертикальными (одной и двумя) струями из промежуточного ковша или через затопленный стакан максимальные потоки стали располагаются у широких стенок лунки слитка в месте ввода струи, при подводе горизонтальными струями - у узкой стенки, противостоящей струе металла. Криволинейная ось лунки слитка обуславливает различие в расположении и величине скорости потоков по противоположным криволинейным сторонам.

При подводе металла одной вертикальной струей максимальные потоки стали отмечаются на расстоянии 500-600 мм от мениска по стороне меньшего радиуса и 750-900 мм по стороне большего; при подводе одной горизонтальной струей - соответственно на расстояниях 200-400 и 200 мм. Подвод металла двумя струями приводит к некоторому смещению области максимальных потоков стали вверх. При подводе металла вертикальными струями из промежуточного ковша максимальные потоки отмечаются на расстоянии 500-600 мм от мениска по стороне меньшего радиуса и 400-750 мм - по стороне большего; при подводе горизонтальными струями - на расстоянии 100 мм от мениска по обеим сторонам.

При всех способах подвода металла скорость максимальных потоков стали у стенок лунки слитка оказалась большей по стороне меньшего радиуса. Величины скорости этих потоков для подвода металла одной вертикальной или одной горизонтальной струей через затопленный стакан соответственно в 2,2-2,5 и 1,4 раза больше по сравнению с этими же значениями при подводе металла вертикальной струей из промежуточного ковша. Наполнение кристаллизатора двумя струями приводило к уменьшению скорости максимальных потоков стали примерно в 2 раза при подводе металла из промежуточного ковша и практически не влияло на скорость максимальных потоков при подводе металла горизонтальной струей.

Различие в величинах скорости потоков стали у стенок лунки слитка по сторонам большего и меньшего радиусов оказалось наибольшим при наполнении затопленной вертикальной струей. Оно характеризовалось в 2,3-2,7 раза большим значением, чем при наполнении горизонтальной струей или же струей из промежуточного ковша. При подводе металла двумя струями различие

в величинах скорости потоков у криволинейных стенок лунки слитка уменьшалось примерно в 2 раза по сравнению с подводом одной струей.

Выполненные исследования показали, что скорость разливки не влияет на расположение максимальных потоков. С увеличением скорости разливки почти в 2 раза (от 0,5 до 0,9 м/мин) скорость максимальных потоков у стенки лунки слитка по стороне меньшего радиуса увеличивается в 1,2-1,3 раза при подводе металла одной струей из промежуточного ковша и в 1,7 раза - при подводе горизонтальной струей. Аналогичное повышение скорости разливки практически не влияет на скорость максимальных потоков при подводе металла двумя струями из промежуточного ковша и несколько (в 1,3 раза) увеличивает скорость этих потоков при подводе металла двумя горизонтальными струями. При увеличении скорости разливки практически не изменяется различие скорости потоков стали у оболочки слитка по его противоположным широким сторонам.

Для определения глубины проникновения струи при вертикальном подводе металла экспериментальные данные изменения скорости потока на оси струи, полученные моделированием различных скоростей разливки, аппроксимировали в виде функции

$$(W_{ось}^x)^K \cdot \frac{x}{d} = B,$$

где $W_{ось}^x$ - скорость потока в центре струи на расстоянии x мм от мениска, м/сек;

$\frac{x}{d}$ - расстояние от мениска, в калибрах;

d - диаметр струи на входе, мм;

K, B - постоянные.

При подводе металла струей из промежуточного ковша, смещенной к узкой стенке кристаллизатора, указанная зависимость имела вид

$$(W_{\text{ось}}^x)^{1,32} \cdot \frac{x}{d} = 74,9 \quad (1)$$

Влияние технологических режимов непрерывной разливки стали на теплообмен между радиальным кристаллизатором и слитком

Скорость разливки. Взаимодействие непрерывного слитка с криволинейными стенками кристаллизатора характеризуется относительным временем контакта, представляющим величину

$$M = \frac{\tau_k}{\tau_p} \cdot 100, \quad \%,$$

где τ_k - суммарная продолжительность контакта, сек;
 τ_p - продолжительность работы электроконтактора, сек.

Найденные величины M для разных значений скорости разливки отличаются от нуля по всей активной длине кристаллизатора, что свидетельствует об отсутствии как зоны сплошного контакта, так и зоны сплошного газового зазора в радиальном кристаллизаторе.

Установленные в работе зависимости среднего относительного времени контакта оболочки слитка со стенками кристаллизатора по сторонам меньшего (\bar{M}_2) и большего (\bar{M}_R) радиусов имеют вид

$$\bar{M}_2 = 57,8 - 3,8\sqrt{\frac{z}{v}}, \quad (2)$$

$$\bar{M}_R = 56,6 - 3,5\sqrt{\frac{z}{v}}, \quad (3)$$

где v - скорость разливки, мм/сек;
 z - активная длина кристаллизатора, мм.

С увеличением скорости разливки от 0,4 до 0,8 м/мин среднее относительное время контакта оболочки слитка со стенкой меньшего радиуса возрастает с 21,4 до 32,1%, со стенкой большего радиуса - с 23,4 до 33,1%, т.е. примерно в 1,5 и 1,4 раза. Различие величины относительного времени контакта слитка с криволинейными стенками кристаллизатора находится в пределах погрешности его определения.

Статистической обработкой экспериментальных данных установлены следующие зависимости среднего теплового потока через стенки меньшего (\bar{q}_2) и большего (\bar{q}_R) радиусов кристаллизатора от скорости разливки:

$$\bar{q}_2 = \frac{34,4 v}{z} \left[\left(1 + 0,110 \frac{z}{v} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \cdot 10^6, \quad \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}), \quad (4)$$

$$\bar{q}_R = \frac{31,1 v}{z} \left[\left(1 + 0,128 \frac{z}{v} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \cdot 10^6, \quad \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}). \quad (5)$$

Согласно зависимостям (4), (5) с увеличением скорости разливки от 0,4 до 0,9 м/мин средний удельный тепловой поток в радиальном кристаллизаторе по обеим криволинейным сторонам возрастает приблизительно от $0,7 \cdot 10^6$ до $0,9 \cdot 10^6$ ккал/м²·час, т.е. в 1,3 раза.

Температура металла. Для расчета влияния температуры жидкой стали на тепловой поток в радиальном кристаллизаторе путем теоретического анализа получена зависимость

$$q = \frac{\lambda \Delta t_1}{\sqrt{(\lambda z_3)^2 + \frac{2\lambda}{\gamma q^*} (\Delta t_1 - \alpha \Delta t_2 z_3) \tau - \frac{4\alpha \Delta t_2}{3\gamma q^*} \kappa \tau^{\frac{3}{2}}}}, \quad (6)$$

где λ - теплопроводность затвердевшей корочки, ккал/(м·час·град);

γ - удельный вес стали, кг/м³;

τ - время затвердевания, час;

- K - коэффициент затвердевания, м/час^{1/2};
- q^* - приведенная теплота затвердевания, ккал/кг;
- Δt_1 - перепад температуры от жидкого металла к воде, °С;
- Z_3 - среднее термическое сопротивление участка "поверхность слитка - поверхность медной стенки", м².час.град/ккал;
- α - средний коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к оболочке слитка, ккал/(м².час.град);
- Δt_2 - средний перегрев жидкой стали, °С.

В уравнении (6) неизвестными являются величины Z_3 , α , Δt_2 . Перенос тепла на участке "слиток - медная стенка" осуществляется теплопроводностью при контакте слитка и стенки, теплопроводностью газовой прослойки между ними, а также излучением. На основании этого запишем

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{Z_k} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_u} \quad (7)$$

Величину $\frac{1}{Z_k}$ можно найти по известной зависимости

$$\frac{1}{Z_k} = \frac{2,1 P \bar{\lambda}}{3\sigma} \cdot 10^4, \quad (8)$$

где $\bar{\lambda} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ - приведенный коэффициент теплопроводности при контакте, ккал/(м.час.град);

λ_1, λ_2 - теплопроводность меди и слитка, ккал/(м.час.град);

σ - предел прочности корочки слитка, кг/м²;

$P = \frac{1}{2} \gamma \mathcal{L}$ - удельное ферростатическое давление,

Термическая проводимость газовой прослойки равна

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{\lambda_2}{\delta_2}, \quad (9)$$

где λ_2 - теплопроводность газовой прослойки, равная согласно исследованиям А.А.Скворцова и А.Д.Акименко 0,08 ккал/(м.час.град);

δ_2 - толщина газового зазора (определявшаяся экспериментально профилированием поверхности слитков), м.

Значение $\frac{1}{Z_u}$ может быть определено по известному отношению

$$\frac{1}{Z_u} = \frac{\epsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \quad (10)$$

где ϵ_n - приведенная степень черноты при теплообмене лучеиспусканием;

C_0 - постоянная, равная 4,9 ккал/(м.час.°К⁴);

T_1 - температура поверхности слитка, °К;

T_2 - температура поверхности медной стенки, °К.

Для определения средних значений перегрева Δt_2 жидкой стали, перемещающейся вдоль фронта затвердевания, получено уравнение

$$\Delta t_2 = \frac{(y_{z,R} - R_{стр})_{ср} \gamma C}{7,5 \mathcal{L}_{стр}} \Delta t_{2_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{7,5 \mathcal{L}_{стр}}{(y_{z,R} - R_{стр}) \gamma C}} \right), \quad (11)$$

где Δt_{2_0} - начальный перегрев жидкой стали, °С;

$y_{z,R} = \frac{D}{2} \mp \sqrt{R_{осб}^2 - (H_0 - x)^2} \pm \sqrt{R_{осб}^2 - H_0^2} - K \sqrt{\frac{x}{\sigma}}$ - расстояние от оси струи до фронта затвердевания по сторонам меньшего (z) и большего (R) радиусов, мм;

D - толщина слитка, мм;

$R_{осб}$ - радиус криволинейного слитка, мм;

H_0 - расстояние от мениска металла до горизонтальной плоскости из центра кривизны, мм;

K - коэффициент затвердевания, мм/сек^{1/2};

$R_{стр} = 0,32 D_2$ - радиус факела струи, мм;

$D_2 = \frac{2,1(D - 9\sqrt{\frac{2\beta D}{\gamma(1+\beta)}})(\beta D - 9\sqrt{\frac{2\beta D}{\gamma(1+\beta)}})}{D(1+\beta) - 18\sqrt{\frac{2\beta D}{\gamma(1+\beta)}}}$ - гидравлический диаметр замкнутого пространства лунки слитка, мм;

β - соотношение сторон слитка;

$L_{стр}$ - глубина проникновения струи, оцениваемая приближенно по уравнению (1), в калибрах.

Средние коэффициенты теплоотдачи α от жидкого металла к затвердевающей оболочке по противоположным криволинейным сторонам определяются по формуле

$$\alpha_{z,R} = 31000 \cdot \frac{-(0,061 + \frac{0,043}{R_{осб}}) (\frac{1,9 D_2}{d} - 4)}{\gamma_{z,стр} + \gamma_{R,стр} - 2R_{стр,стр}} \cdot (12)$$

Тепловые потоки, рассчитанные по зависимостям (6) - (12) для случая заполнения лунки радиального слитка сечением 180x900 мм вертикальной струей, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает достоверность разработанной методики.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении перегрева жидкой стали на каждые 10⁰С удельный тепловой поток в кристаллизаторе возрастает на 4-6% по сравнению с тепловым потоком от неперегретой стали.

Способ подвода металла. Впервые экспериментально изучено взаимодействие слитка, отливавшегося с горизонтальным подводом металла и защитой мениска шлаком, со стенками кристаллизатора методом электроконтакта. Установлено, что контактирование, как и при разливке с подводом металла струей из промежуточного ковша и открытым мениском, носит пульсирующий, неустановившийся характер. Оболочка слитка периодически касается медных стенок кристаллизатора в различных точках по их ширине и высоте. Относительное время контакта слитка со стенками кристаллизатора на 5-10% больше, чем при разливке с открытым мениском. Большая степень контактирования при разливке с защитой мениска стали шлаком может привести к увеличению теплового потока в кристаллизаторе.

Для проверки этого положения провели сравнительный анализ процесса теплопередачи в радиальном кристаллизаторе (зависимости (8) - (12) для обоих вариантов разливки.

Установлено, что при защите мениска металла шлаком термическая проводимость участка "слиток - кристаллизатор", определяющая в основном тепловой поток в кристаллизаторе, близка к термической проводимости этого участка при разливке с открытым мениском. Однако, если в первом случае термическая проводимость участка определяется прежде всего теплопроводностью газовых прослоек (~95% общей проводимости), то во втором она зависит в основном от теплопроводности при контактировании слитка со стенками кристаллизатора (~66% общей проводимости).

Результаты теоретического анализа тепловых потоков в радиальном кристаллизаторе при сравниваемых способах разливки подтверждены экспериментальными

исследованиями. Этими исследованиями установлена также следующая особенность теплопередачи при подводе металла струей из промежуточного ковша. Величины средних квадратических отклонений относительного времени контакта оболочки слитка со стенками кристаллизатора и теплового потока в кристаллизаторе соответственно в 1,4-1,6 и 1,1-1,5 раза больше по стороне меньшего радиуса, чем по стороне большего. Это обусловлено различной величиной потоков стали у фронта затвердевания по противоположным криволинейным сторонам слитка.

Влияние некоторых параметров технологии непрерывной разливки на кинетику затвердевания радиального слитка

Экспериментально исследовано затвердевание прямоугольных слитков при наполнении кристаллизатора вертикальной струей.

Установлено, что нарастание корочки слитка характеризуется практически одинаковой интенсивностью по противоположным криволинейным сторонам. Толщина корочки на выходе из кристаллизатора может быть определена по формуле

$$m = \sqrt{(0,053 \frac{D}{2})^2 + 9,95 \frac{Z}{v}} - (0,053 \frac{D}{2}), \quad (13)$$

где m - толщина корочки, мм.

Неравномерность фронта затвердевания характеризовали коэффициентом вариации η толщины корочки

$$\eta = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100, \quad \%,$$

где σ - среднеквадратическое отклонение толщины корочки слитка в данном поперечном сечении, мм;

\bar{x} - средняя толщина корочки в том же сечении, мм.

Максимальные коэффициенты вариации толщины корочки отмечались на расстоянии 300-600 мм от мениска по стороне меньшего радиуса и 700-1000 мм по стороне большего и характеризовались большей величиной по стороне меньшего радиуса. Приведенные данные согласуются с результатами исследования гидродинамики жидкой стали и тепловых потоков в кристаллизаторе при этом способе подвода металла.

С увеличением скорости разливки слитков сечением 160x900 и 180x900 мм от 0,5 до 0,8 м/мин максимальные значения коэффициента вариации толщины корочки в кристаллизаторе возрастают от 5-10 до 16-30% по стороне меньшего радиуса и от 5-13 до 5-25% по стороне большего; на выходе из кристаллизатора соответственно от 8 до 18% и от 5 до 8%. Увеличение неравномерности фронта затвердевания слитков с повышением скорости разливки объясняется возрастанием скоростей потоков жидкой стали у стенок лунки слитка.

Найдена зависимость длины жидкой фазы от скорости разливки

$$L_{ж.ф.} = 0,0234 D^2 v, \quad (14)$$

где $L_{ж.ф.}$ - длина жидкой фазы, мм.

Интенсивность затвердевания слитка в кристаллизаторе при подводе металла горизонтальной струей и защите мениска стали шлаком такая же, как и при подводе струей из промежуточного ковша. Этот вывод согласуется с результатами исследования тепловых потоков в кристаллизаторе при сравниваемых способах подвода струи.

Неравномерность фронта затвердевания слитка при горизонтальном подводе металла иная, чем при вертикальном. Коэффициент вариации толщины корочки слитка в первом случае характеризуется максимальными значениями в районе мениска (30% по стороне меньшего радиуса и 15-17% по стороне большего) и монотонно убывает до 11 и 8% соответственно к выходу из кристаллизатора, причем различие значений коэффициента вариации по противоположным сторонам не превышает 2-3%. Полученные результаты совпадают с результатами исследования гидродинамических процессов.

Коэффициент вариации толщины корочки слитка при вертикальном подводе металла характеризуется большей величиной к выходу из кристаллизатора (14 и 18% соответственно по сторонам меньшего и большего радиусов), причем различие в значениях коэффициента вариации по противоположным криволинейным сторонам достигает 6-7%.

Изменение толщины корочки слитка в кристаллизаторе в зависимости от перегрева жидкой стали, соответствующее результатам теоретического анализа тепловых потоков, определяли по формуле

$$\xi = \sqrt{(\lambda z_3)^2 + \frac{2\lambda}{\gamma q^*} (\Delta t_1 - \alpha \Delta t_2 z_3) \tau - \frac{4\alpha \Delta t_2}{3\gamma q^*} k \tau^{\frac{3}{2}} - \lambda z_3}, \quad (15)$$

где ξ - толщина корочки, м.

Данные изменения толщины корочки, полученные по разработанным зависимостям (15), (7)-(11), удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать эти зависимости для оценки влияния перегрева жидкой стали. При повышении перегрева жидкой стали на каждые 10°С толщина затвердевшей корочки слитка уменьшается на 5% по сравнению с толщиной корочки при отсутствии перегрева.

Влияние технологического режима непрерывной разливки на качество радиальных слитков

Осмотр поверхности слитков сечением 180x900 мм из углеродистой стали Ст.3сп показал, что основными наружными дефектами являются горячие поперечные и продольные трещины. Грани меньшего радиуса поражены ими в большей степени (50% слэбов имели поперечные трещины только на этой грани). Это связано с особенностями гидродинамических процессов в лунке радиального слитка.

Установлено, что технологические параметры разливки определяют качество отливаемых слитков.

С повышением температуры металла в промежуточном ковше от 1520 до 1600°С количество поперечных трещин возрастает от 0,1 до 0,4 шт. на 1 м длины, длина продольных трещин - от 25 до 85 мм на 1 м длины. С повышением скорости разливки от 0,4 до 0,8 м/мин количество поперечных трещин увеличивается от 0,3 до 4,5 шт. на 1 м длины на широких гранях слитков и от 0,1 до 1,0 шт. на 1 м длины на узких.

Возрастание пораженности слитков наружными трещинами с повышением температуры металла и скорости разливки связано с увеличением неравномерности фронта затвердевания и перепада температур по сечению формирующегося слитка.

При наполнении кристаллизатора затопленной струей и защите мениска шлаком резко уменьшается количество поперечных трещин (до 0,1 шт. на 1 м длины) и практически ликвидируются продольные трещины даже при максимальных скоростях разливки. Это связано с образованием на стенках кристаллизатора шлакового гарниссажа, обеспечивающего более свободную усадку слитка.

Полученные результаты позволяют заключить, что подвод металла затопленной струей и защита мениска стали в кристаллизаторе шлаком являются эффективным способом устранения наружных трещин на слябах радиальной разливки.

Анализ размеров поперечного сечения радиальных слитков показал, что ширина граней меньшего и большего радиусов различная, т.е. слитки имеют профиль трапеции. Это является следствием деформации слябов в правильно-тянущем устройстве. С увеличением скорости разливки от 0,6 до 0,9 м/мин разность ширины граней меньшего и большего радиусов слитка сечением 180 x 900 мм возрастает от 1,5 до 4 мм. Поскольку разность невелика, специальных мер борьбы с искажением не требуется. При необходимости можно задавать обратную трапецию в поперечном сечении кристаллизатора.

В структуре радиальных непрерывных слитков наблюдаются, как правило, две зоны: зона столбчатых дендритов и осевая зона разориентированных дендритов. Особенностью макроструктуры является большая протяженность зоны столбчатых дендритов по стороне меньшего радиуса вследствие нарушения в процессе формирования слитка изотермичности объемов жидкого металла у фронта затвердевания по криволинейным сторонам.

С повышением температуры жидкой стали в печи перед раскислением от 1610 до 1680°С и скорости разливки от 0,5 до 0,8 м/мин разность длины зоны столбчатых дендритов увеличивается соответственно от 8 до 12 мм и от 6 до 9 мм, что объясняется усугублением асимметрии изотермичности объемов жидкой стали у фронта затвердевания по противоположным криволинейным сторонам.

С увеличением температуры жидкого металла в

печи перед выпуском от 1610 до 1680°С протяженность осевой зоны разориентированных дендритов уменьшается от 28 до 11 мм.

Для непрерывных слитков характерно также смещение теплового центра. Независимо от изменения основных технологических параметров оно не превышает 0,8 мм, что составляет 0,5% толщины слитков.

Механические свойства прокатанного из слябов металла соответствуют требованиям ГОСТ 380-60. Это позволяет заключить, что различная протяженность зоны столбчатых дендритов по противоположным криволинейным сторонам и смещение теплового центра не оказывают вредного влияния на качество стали.

Осмотр темплетов и серных отпечатков показал, что основными дефектами внутреннего строения радиальных слитков являются горячие трещины и ликвационные полосы в зоне столбчатых дендритов и трещины по большой оси поперечного сечения.

При увеличении температуры металла в печи перед раскислением до 1700°С количество слитков с осевыми трещинами возрастает до 30%.

С повышением скорости разливки от 0,5 до 0,9 м/мин количество слитков с трещинами в зоне столбчатых дендритов и осевой зоне увеличивается соответственно от 35 до 100% (длина трещин в поперечном сечении при скорости разливки 0,9 м/мин не превышает 70 мм) и от 2,1 до 33%. Количество слитков с трещинами по большой оси поперечного сечения возрастает до 75% при увеличении числа резких изменений скорости разливки до 17.

Отливка слябов с расходом воды на вторичное охлаждение в пределах 1,10-1,25 л/кг стали практически

исключает образование трещин (количество слитков с трещинами до 2,3%). Увеличение расхода воды более 1,25 л/кг или снижение его менее 1,10 л/кг приводит к значительной пораженности слитков трещинами (до 53-62%).

Влияние технологических параметров на пораженность слитков внутренними трещинами объясняется, в основном, изменением термических напряжений в формирующейся корочке слитка. На образование осевых трещин влияет также развитие усадочных и ликвационных дефектов, обусловленных неравномерностью фронта затвердевания.

В результате исследований установлено, что характер влияния параметров непрерывной разливки на развитие внутренних трещин в слитках (а также наружных трещин) одинаковый при радиальном и вертикальном расположении технологической оси установки. В то же время технологические режимы при радиальной непрерывной разливке стали более резко влияют на качественные показатели литых слябов.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На первой отечественной промышленной установке радиального типа (200-т ковш, слитки 180x900 мм, 160x900 мм, радиус 8 м), а также в лабораторных условиях методом гидравлического моделирования изучено влияние основных технологических параметров непрерывной разливки спокойной углеродистой стали: способа подвода металла в кристаллизатор, скорости разливки, температуры металла и режима вторичного охлаждения на затвердевание и качество слябов.

2. Методом гидравлического моделирования установлено, что при наполнении кристаллизатора вертикальной струей максимальные потоки у криволинейных стенок лунки слитка располагаются ниже мениска на расстояниях, в 2-4 раза больших, чем при подводе металла горизонтальной струей. Различие величин скорости потоков у фронта затвердевания по противоположным криволинейным сторонам приблизительно в 2 раза меньше при подводе металла двумя струями, чем при подводе одной струей.

3. Исследования на промышленной радиальной УНРС показали, что при наполнении кристаллизатора затопленной горизонтальной струей и защите мениска металла шлаком контактирование слитка со стенками кристаллизатора носит пульсирующий, неустановившийся характер. Тепловой поток в кристаллизаторе практически одинаковый при подводе металла горизонтальной струей и струей из промежуточного ковша.

4. Установлены эмпирические зависимости, характеризующие влияние скорости разливки на теплопередачу в радиальном кристаллизаторе. Показано, что с увеличением скорости разливки от 0,4 до 0,8 м/мин средний тепловой поток в кристаллизаторе возрастает в 1,3 раза.

5. Разработаны теоретические зависимости для расчета влияния перегрева жидкой стали на теплоотдачу и затвердевание непрерывных слитков в радиальных кристаллизаторах. При увеличении перегрева стали на каждые 10°С тепловые потоки в кристаллизаторе возрастают на 4-6%, толщина оболочки слитка соответственно уменьшается.

6. Экспериментально установлены зависимости толщины корочки радиального непрерывного слитка на выходе из кристаллизатора и длины жидкой фазы от ско-

рости разливки. Неравномерность толщины корочки слитка в кристаллизаторе увеличивается с повышением скорости разливки при подводе металла вертикальной струей прежде всего по стороне слитка меньшего радиуса.

7. Изменение способа подвода металла в радиальный кристаллизатор не влияет на скорость затвердевания, что позволяет использовать установленные закономерности затвердевания слитков при подводе металла струей из промежуточного ковша и разливке с открытым мениском для подвода металла горизонтальной струей и защиты мениска шлаком. При наполнении кристаллизатора горизонтальной струей уменьшается неравномерность толщины корочки слитка по противоположным криволинейным сторонам на выходе из кристаллизатора.

8. Пораженность радиальных непрерывных слитков спокойной углеродистой стали наружными поперечными и продольными трещинами возрастает с увеличением перегрева жидкого металла или скорости разливки. При подводе металла затопленной струей и защите мениска шлаком практически устраняется образование наружных трещин, что позволяет увеличивать скорость разливки.

9. Количество и длина трещин в зоне столбчатых дендритов радиальных непрерывных слитков увеличиваются с повышением скорости разливки. Количество слябов с осевыми трещинами возрастает с увеличением расхода воды на вторичное охлаждение, перегрева металла, скорости разливки, а также при резких изменениях скорости. Осевые трещины в слитках не возникают при оптимальном расходе воды на вторичное охлаждение и равномерном охлаждении сляба по всей длине жидкой фазы, минимальном перегреве металла и полном отсутствии резких изменений скорости разливки.

11. Результаты проведенной работы учтены при

составлении технологических инструкций по непрерывной разливке стали на радиальной УНРС Руставского металлургического завода. Внедрение разработанных технологических параметров позволило значительно улучшить качество слябов (брак до 0,42%) и повысить качество листов (брак до 0,1%, выход первого сорта 99,3%), что дало в 1970 г. (вместе с другими мероприятиями) экономический эффект в сумме 340 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Затвердевание широких прямоугольных непрерывных слитков в радиальном положении. В сб. "Проблемы стального слитка". Труды III конференции по слитку. Изд-во "Металлургия", 1969.

2. Непрерывная разливка углеродистой стали на радиальной установке "Металлургическая и горнорудная промышленность", 1969, № 2.

3. Исследование теплофизических процессов затвердевания непрерывных слитков в радиальном положении. В сб. "Проблемы стального слитка". Труды IУ конференции по слитку. Изд-во "Металлургия", 1969.

4. Исследование технологии непрерывной разливки стали на радиальной установке. В сб. "Непрерывная разливка стали". Изд-во "Металлургия", 1970.

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены:

1. На IУ Всесоюзной конференции "Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков" (г. Донецк, 1968 г.).

2. На Научно-техническом Совете в Украинском научно-исследовательском институте металлов (г. Харьков, январь 1971 г.).

3. На совместном заседании кафедр "Литейное производство" и "Металлургические и нагревательные печи" Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова (г. Горький, февраль 1971 г.).

Отв. за выпуск В. Ходоревская

БЦ 20166. Подписано к печати 15/УП 1971 г.

Физ. печ. л. 3,2. Усл. печ. л. 1,1.

Заказ 130. Тираж 175.

Ротапринт УКРНИИМЕТА. Харьков, ул. Дарвина, 20