

УМЕНЬШЕНИЕ ОСЕВОЙ ЛИКВАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСХОДУЕМЫХ МАКРОХОЛОДИЛЬНИКОВ В УСЛОВИЯХ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

Студент 5-го курса

Российская Федерация, г.Москва, Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана, кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Научный руководитель: Г.С.Никитин,

доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

1. Постановка задачи

В связи с постоянным ужесточением требований к качеству стали является актуальной задача минимизации степени осевой ликвации в непрерывнолитых заготовках. Непрерывнолитой сляб формируется в условиях весьма протяженной жидкой фазы и интенсивного развития конвективных потоков металла, влияющих на структурную и химическую неоднородность.

Для решения задач подавления или значительного ослабления неоднородности по толщине сляба, а также устранения несплошности и рыхлости осевой зоны предлагается технология разливки с использованием расходуемых макрохолодильников [1,2]. Существенного улучшения кристаллической структуры и уменьшения осевой ликвации в слябах можно добиться путем ввода тонкой стальной ленты или проволоки в жидкую лунку кристаллизатора. За счет нагрева и плавления макрохолодильника компенсируется перегрев жидкой стали, поступающей в кристаллизатор, что способствует переходу от последовательной кристаллизации к объемной, улучшаются условия формирования зоны равноосных кристаллов в средней части по сечению сляба, происходит существенное снижение степени осевой ликвации химических элементов.

Использование в качестве расходуемого макрохолодильника стальной ленты представляется более предпочтительным с точки зрения отбора теплоты у перегретого металла по сравнению с проволокой, но ввод проволоки гораздо легче обеспечить в условиях производства ОАО «Северсталь»; кроме того, проволока обладает большей механической устойчивостью в расплаве, что позволит ей проникать на всю глубину жидкой фазы, предотвращая отрыв фрагментов проволоки и вмораживание их в кристаллизующиеся участки непрерывнолитой заготовки. Поэтому в качестве макрохолодильника была выбрана проволока.

2. Выбор химического состава проволоки

При введении проволоки в расплав будут протекать последовательно 2 явления: намораживание металла на проволоку, прогрев проволоки и ее плавление. Для того чтобы добиться гарантированного плавления проволоки, рекомендуется применять проволоку с содержанием углерода более 0,4%. При использовании низкоуглеродистой проволоки с более высокой температурой ликвидуса возможен следующий неблагоприятный процесс: прогрев проволоки до температуры разливаемого металла после расплавления

намороженной корочки, потеря механической прочности, отрыв отдельных фрагментов, распространение их потоками стали по объему жидкой лунки и вмораживание в матричный металл.

3. Расчет скорости ввода проволоки в кристаллизатор

Был проведен расчет максимальной и рекомендуемой скоростей введения проволоки в кристаллизатор, а также предложена формула для определения уменьшения перегрева жидкой лунки. Эти данные требовалось получить для различных начальных условий системы:

- для диаметров проволоки от 10 до 16 мм;
- для значений перегрева стали 15, 20, 25, 30, 35 градусов;
- для скоростей разливки от 0,6 до 1,3 м/мин;

Скорость введения проволоки (м/мин) определяется из уравнения:

$$V = \frac{D}{\tau \cdot 60} ,$$

где D , м – глубина жидкой лунки по линии ликвидуса (м); τ - время расплавления проволоки (сек).

Глубину жидкой лунки определяют скорость разливки, химсостав разливаемой стали (в большей степени содержание углерода, понижающего температуру ликвидуса), а также режим охлаждения. Колебания перегрева жидкой стали над температурой ликвидуса при разливке в заданном диапазоне (от 15 до 35⁰С) не оказывают значительного влияния на протяженность жидкой фазы (например, для низколегированной стали повышение температуры разливки на 20⁰С привело к увеличению глубины лунки на 0,75 м, что составило 2,5% от общей ее протяженности). На основе данных [3] компании «Уралмаш – Metallurgical equipment», являющейся поставщиком УНРС для «Северстали», для некоторых типов сталей были выведены теоретические зависимости для определения глубины жидкой лунки по линии ликвидуса от скорости разливки V_p (толщина слитка 250 мм):

$$\text{высокоуглеродистая сталь (типа 9ХФ): } D = 12,822 \cdot V_p + 0,76$$

$$\text{среднеуглеродистая сталь (типа сталь 3): } D = 16,376 \cdot V_p + 0,938$$

$$\text{низколегированная сталь (типа 14ГС): } D = 14,4 \cdot V_p + 3,04$$

Время расплавления определялось экспериментально путем ввода проволоки диаметров 10, 12 и 15 мм из стали 20 в промежуточный ковш при различной температуре металла в нем при разливке стали марки SAE 1006. Ввод проволоки осуществлялся в промковш, а не в кристаллизатор, поскольку именно в нем в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь» проводится замер температуры разливаемой стали; разница температур между этими двумя узлами составляет 15 градусов. В процессе разливки одной 350-тонной плавки трижды замерялась температура в промковше, после чего производилось погружение отрезков проволоки. Результаты эксперимента представлены на рис.1.

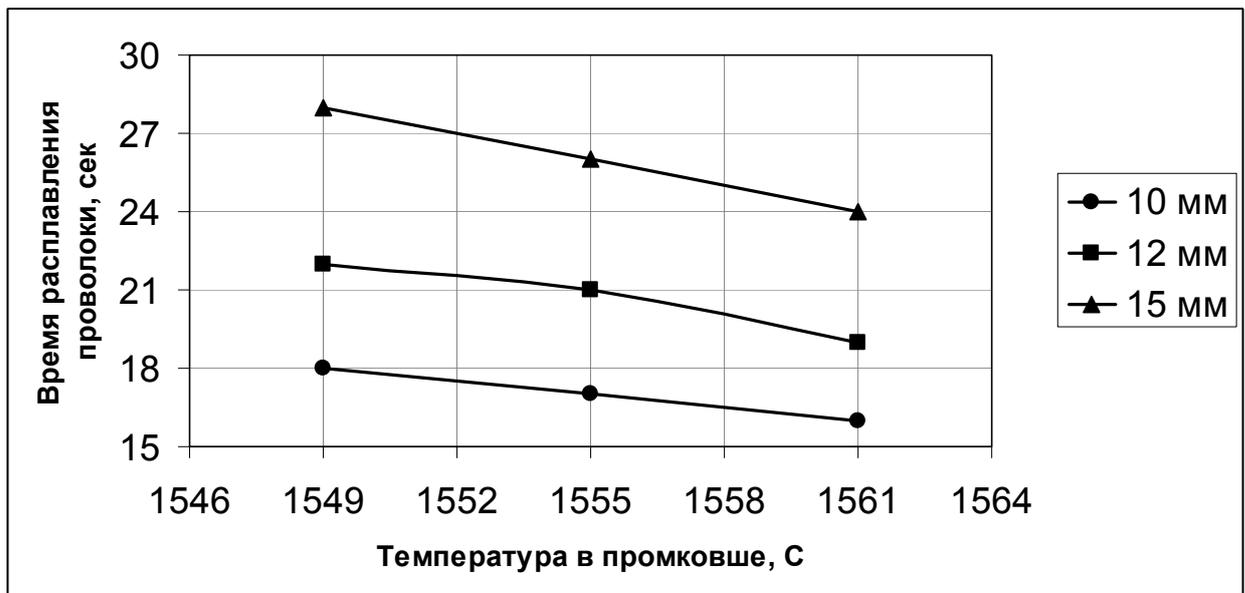


Рис.1. Зависимость времени расплавления проволоки различного диаметра от температуры металла в промежуточном ковше УНРС.

На основе опытных данных была получена формула для расчета времени расплавления проволоки:

$$\tau = D_{np} \cdot (34,407 - 0,021 \cdot T),$$

где D_{np} - диаметр проволоки, мм; T – температура металла в промковше.

Для гарантированного предотвращения армирования проволокой кристаллизующегося расплава в [1] рекомендуется полученные значения скоростей ввода проволоки уменьшить на 40 %.

4. Расчет снижения перегрева жидкой лунки

Уменьшение перегрева жидкой лунки металла определяется из условия баланса количества теплоты, т.е. уменьшение теплосодержания металла в единицу времени должно быть равно количеству теплоты, отобранного проволокой.

Количество тепла, отобранное проволокой:

$$Q_{np} = c_{np.TB} \cdot m_{np} \cdot (T_{S,np} - T_{0,np}) + L \cdot m_{np} + c_{np.Ж} \cdot m_{np} \cdot (T_{L.M} + \Delta T_{nep} - T_{L,np})$$

или

$$Q_{np} = V_{np} \cdot \frac{\pi \cdot D_{np}^2}{4} \cdot (c_{np.TB} \cdot \rho_{np.TB} \cdot (T_{S,np} - T_{0,np}) + L \cdot \frac{\rho_{np.TB} + \rho_{np.Ж}}{2} + c_{np.Ж} \cdot \rho_{np.Ж} \cdot (T_{L.M} + \Delta T_{nep} - T_{L,np} - \Delta T))$$

где $c_{np.TB}, c_{np.Ж}$ - теплоемкость проволоки в твердом и жидком состоянии, кДж/(кг*К); V_{np} - скорость введения проволоки, м/мин; L - скрытая теплота

плавления проволоки, кДж/кг; $\rho_{np.TB}$, $\rho_{np.Ж}$ - плотность материала проволоки в твердом и жидком состоянии, кг/м³; $T_{L,np}$, $T_{S,np}$ - температура ликвидуса и солидуса проволоки, °С; $T_{0,np}$ - начальная температура проволоки, °С; $T_{L.M}$ - температура ликвидуса разливаемого металла, °С; ΔT_{nep} - начальный перегрев металла над температурой ликвидуса; ΔT - понижение температуры металла.

Теплосодержание металла в единицу времени:

$$Q_M = c_M \cdot m_M \cdot \Delta T = c_M \cdot \rho_M \cdot V_p \cdot A \cdot B \cdot \Delta T$$

где c_M - теплоемкость жидкой стали, кДж/(кг*К); ρ_M - плотность жидкой стали, кг/м³; V_p - скорость разливки, м/мин; А и В – ширина и толщина кристаллизатора, мм.

Уменьшение перегрева жидкой лунки:

$$\Delta T = \frac{c_{np.TB} \cdot \rho_{np.TB} \cdot (T_{S,np} - T_{0,np}) + L \cdot \frac{\rho_{np.TB} + \rho_{np.Ж}}{2} + c_{np.Ж} \cdot \rho_{np.Ж} \cdot (T_{L.M} + \Delta T_{nep} - T_{L,np})}{c_{np.Ж} \cdot \rho_{np.Ж} + \frac{4 \cdot c_M \cdot \rho_M \cdot V_p \cdot A \cdot B}{V_{np} \cdot \pi \cdot D_{np}^2}}$$

5. Стабилизация температурного режима разливки

В процессе разливки в связи с заменой оборудования (погружного стакана, промковша) скорость вытягивания непрерывнолитой заготовки уменьшают. Кроме того, температура поступающего в кристаллизатор жидкого металла понижается к концу каждой плавки по причине остывания сталь-ковша.

Стабилизировать температурный режим разливки можно путем изменения скорости введения проволоки. Нахождение зависимости скорости проволоки от текущей скорости разливки и температуры металла в кристаллизаторе, а также от требуемого превышения температуры жидкой стали над температурой ликвидуса является, по сути, решением задачи, обратной вышеизложенной. Эта зависимость выглядит следующим образом:

$$V_{np} = \frac{4 \cdot c_M \cdot \rho_M \cdot V_p \cdot A \cdot B \cdot (T_M - T_{L.M} - \Delta T)}{\pi \cdot D_{np}^2 \cdot (c_{np.TB} \cdot \rho_{np.TB} \cdot (T_{S,np} - T_{0,np}) + L \cdot \frac{\rho_{np.TB} + \rho_{np.Ж}}{2} + c_{np.Ж} \cdot \rho_{np.Ж} \cdot (T_{L.M} + \Delta T - T_{L,np}))}$$

где T_M - температура жидкого металла, °С ($T_M = T_{L.M} + \Delta T_{nep}$); ΔT - требуемое превышение температуры жидкой стали над температурой ликвидуса.

6. Введение порошковой проволоки

Процесс охлаждения металла в кристаллизаторе путем введения порошковой проволоки подробно описан в [4-6] и имеет ряд существенных отличий от рассмотренного выше способа с использованием цельной стальной проволоки:

1. Оболочка порошковой проволоки имеет малую толщину, в результате чего ее нагрев и плавление произойдут за считанные секунды. Это позволит вводить проволоку с более высокой скоростью.

2. Частицы содержащегося в проволоке наполнителя (мелкие частицы железа) сразу после потери сплошности оболочки будут увлекаться турбулентными потоками жидкого металла, распределяясь по объему жидкой фазы и становясь центрами кристаллизации. Таким образом, порошковые инокуляторы обеспечат ускоренное и более равномерное затвердевание стали в жидкой лунке, диспергирование зерна, измельчение и рассредоточение неметаллических включений. Для учета этого явления необходим новый, отличный от вышеизложенного способ расчета влияния инокуляторов на температуру расплава.

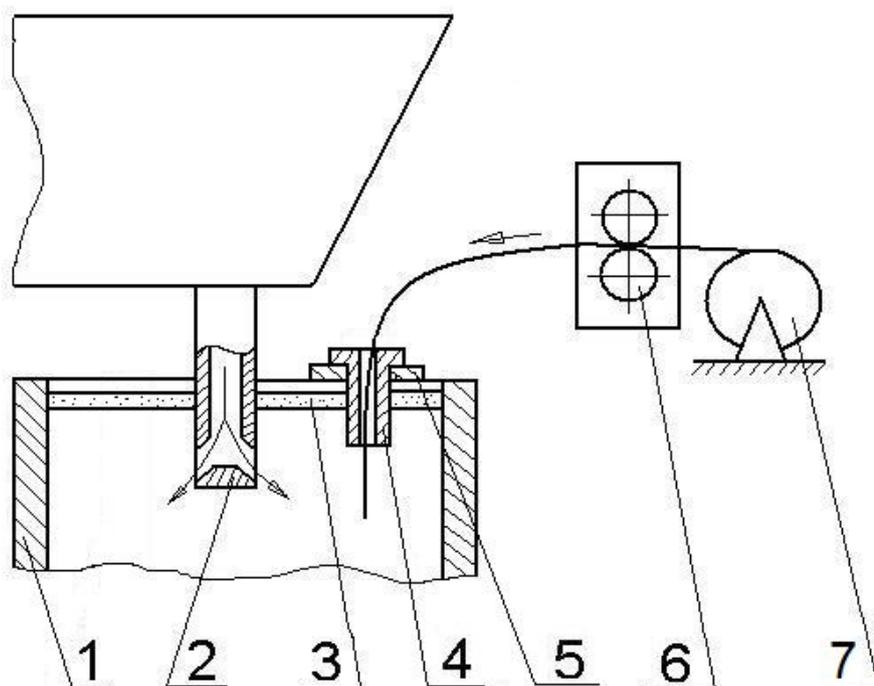
Можно приближенно (без учета влияния п.2) оценить понижение температуры металла в кристаллизаторе с использованием ранее приведенного метода и литературных данных.

Поскольку толщина стенки проволоки составляет 0,4-0,5 мм, то величина намороженного слоя должна колебаться от двух первоначальных толщин при больших значениях перегрева до трех-четырех толщин при малых. При таких толщинах колебания перегрева в пределах 15-30⁰С незначительно сказываются на общей продолжительности плавления, которая составляет 4-6 сек.

7. Прочие особенности технологии

Для лучшего расплавления проволоки и увеличения массовой доли вносимой в расплав твердой фазы на проволоку авторами работы [2] предлагается накладывать упругие колебания, которые позволят в 5-8 раз увеличить коэффициент теплоотдачи конвекцией от жидкого расплава к вносимой твердой фазе. В таком случае создается вынужденный турбулентный поток расплава, уменьшается время прогрева проволоки до температуры расплава и ее расплавления. Источником колебаний может служить электромагнитный вибратор, генерирующий частоту колебаний от 70 до 150 Гц, что обеспечивает максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи и минимальное колебание мениска металла.

При входе проволоки в расплав возможен процесс захватывания шлака с поверхности и проникновения его в жидкую лунку на большую глубину. В этом случае есть риск отбраковки непрерывнолитого сляба по неметаллическим включениям. Для исключения контакта проволоки со шлаком предлагается пропускать проволоку через огнеупорный стакан (по типу погружного стакана), нижний торец которого погружен ниже мениска разливаемой стали. Помимо предотвращения контакта шлака и проволоки стакан будет выполнять также функцию направляющего элемента, обеспечивающего точное направление подачи проволоки (рис.2). Для закрепления стакана предлагается использовать опорную плиту с отверстием, в которое будет вставляться стакан. Плита будет располагаться на горизонтальной поверхности кристаллизатора и вместе с ним совершать качательные движения.



1 – кристаллизатор; 2 – погружной стакан; 3 – шлак; 4 – огнеупорный направляющий стакан; 5 – опорная плита; 6- трайб-аппарат; 7 – бунт проволоки.

Рис.2

8. Ожидаемый эффект

В работах [1] и [2] отмечается рост скорости кристаллизации, утолщение в 2-4 раза корки у слэбов, отлитых с использованием расходоуемых макрохолодильников. Также отмечено резкое (в 2-3 раза) расширение зоны равноосных кристаллов с одновременным сужением зоны столбчатых кристаллов, наблюдается образование зоны глобулярных кристаллов. Плотность дендритной структуры у опытного металла возрастает, расстояния между осями дендритов первого порядка на 15-20 % меньше, чем у слэба, отлитого по обычной технологии.

9. Результаты теоретической работы и выводы

В ходе работы был выбран предпочтительный тип макрохолодильника, обоснован его рекомендуемый химический состав, выведены формулы расчета скорости введения в кристаллизатор.

Для ускорения проведения трудоемких вычислений в среде Delphi 7.0 была разработана программа MacroHoloD, в интерактивном режиме выполняющая расчет по определению скорости введения проволоки в кристаллизатор и уменьшения перегрева жидкой лунки при этом процессе.

Список литературы

1. Белый А.П., Исаев О.Б., Матросов Ю.И., Носоченко А.О. Центральная сегрегационная неоднородность в непрерывнолитых листовых заготовках и толстолистовом прокате. – М.: Металлургиздат, 2005. С. 59-77.

2. Носоченко О.В., Исаев О.Б., Лепихов Л.С. и др. // Сталь. 2003. №9. С. 42-44.
3. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. и др. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. – Екатеринбург, 2004. С. 240-242.
4. Буймов В.А., Селезнев Ю.А., Кузьменко А.Г. и др. // Сталь. 1999. №5. С. 33-34.
5. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 10-11.
6. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 21-24.