

Выбор оптимальных условий теплоотвода с боковой поверхности непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения

Предложена методика оценки изменения интенсивности теплообмена в зоне вторичного охлаждения по толщине затвердевшей корки. Данный режим охлаждения обеспечивает оптимальные условия формирования непрерывнолитой заготовки, исключает повторный разогрев боковой поверхности и снижает вероятность появления наружных трещин и дефектов, обусловленных повышенным термонапряженным состоянием.

Ключевые слова: непрерывная разливка, зона вторичного охлаждения, математическое моделирование, компьютерное моделирование, теплоотвод, затвердевание

Вторичное охлаждение заготовки на машине непрерывного литья начинается непосредственно после ее выхода из кристаллизатора. Функционально эта зона является крайне важной с точки зрения качества заготовки. Это, в первую очередь, относится к предотвращению формирования различного рода термических внутренних напряжений в твердом каркасе заготовки. Параметры вторичного охлаждения оказывают влияние на геометрическую форму заготовки, формирование трещин, осевую пористость и ликвацию.

Система вторичного охлаждения МНЛЗ состоит из опорных элементов, поддерживающих заготовку, устройств, обеспечивающих охлаждение слитка, а также специальных устройств, воздействующих на структуру кристаллизующейся заготовки (электромагнитное воздействие, мягкое обжатие и т. д.).

Опорные элементы направляют движение заготовки и предотвращают деформацию 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 полос вблизи фронта затвердевания.

При снижении интенсивности теплообмена на выходе из кристаллизатора и для предотвращения вторичного разогрева непрерывнолитой заготовки организуют ее максимально интенсивное охлаждение. С целью управления и распределения охлаждающих воздействий по технологической линии МНЛЗ система вторичного охлаждения разделена на несколько зон. Интенсивность охлаждения в каждой из зон определяется скоростью вытягивания непрерывнолитой заготовки.

Роль охлаждения непосредственно под кристаллизатором особенно велика. Это связано, во-первых, с резким изменением условий теплообмена – переходом от контактного в кристаллизаторе к радиационному и конвективному с поверхности слитка. Во-вторых, интенсивность охлаждения

здесь существенно влияет на распределение температур по сечению еще довольно тонкой оболочки и на ее механические характеристики, которые определяют способность твердой фазы к сопротивлению ферростатического давления и деформации оболочки в промежутках, свободных от опорно-охлаждающих устройств [1].

Установлено, что доля суммарного теплоотвода в ЗВО составляет 75-78 %, причем до 40 % тепла передается воде, около 30 % – поддерживающим роликам с внутренним охлаждением, и порядка 8 % потеря происходит за счет конвекции и излучения.

Интенсивность охлаждения во вторичной зоне должна выбираться таким образом, чтобы температура поверхности в процессе ее перемещения или медленно уменьшалась или не изменялась [2, 3].

Известно, что при формировании слитка теплоотвод от внутренних объемов перегретого металла происходит через затвердевшую поверхность. Для благоприятного формирования слитка необходимо, чтобы тепловой поток через затвердевшую корку слитка и теплоотвод с поверхности были одинаковыми.

В случае недостаточного теплоотвода с боковой поверхности наблюдается повышение температуры затвердевшего металла, уменьшение толщины затвердевшей корочки, ее разогрев и как следствие, снижение ее прочностных характеристик. Последнее может привести к аварийным технологическим последствиям.

В случае теплоотвода с боковой поверхности, намного превышающего теплоотвод через затвердевшую корочку, наблюдается резкое снижение температуры наружной поверхности. Следствием этого процесса является увеличение температурного градиента в затвердевающей корке, который обуславливает повышенное термонапряженное состояние затвердевшего металла, которое в критических случаях может привести к трещинообразованию наружной поверхности слитка.

Температура поверхности непрерывнолитой заготовки устанавливается таким образом, что тепловой поток через корку слитка и теплоотвод на поверхности

слитка получаются примерно одинаковыми. Повышение интенсивности теплоотвода ограничивается конечным термическим сопротивлением корки заготовки. Интенсивным охлаждением можно снизить температуру поверхности непрерывного слитка. Однако на температурный режим в корке заготовки и на суммарный теплоотвод оно оказывает несущественное влияние [4]. Принято считать, что оптимальной температурой поверхности заготовки в ЗВО является диапазон 1000-1100 °С. При этом выбор рационального уровня температур заготовки в ЗВО зависит от ряда факторов, включающих марку стали, характер отвода тепла в зоне вторичного охлаждения, тип МНЛЗ и пр. [5].

Протяженность зоны вторичного охлаждения выбирается из соображений того, что температура поверхности существенно не меняется (не наблюдается тепловых скачков) после выхода из ЗВО.

Увеличение ЗВО, как правило, связано с увеличением скорости разливки и поддержанием заданного диапазона температуры поверхности в нижней части слитка.

Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО предусматривается использование участков с различной интенсивностью отвода тепла. Необходимая интенсивность теплоотвода обеспечивается за счет применения различных методов подачи охлаждающего вещества, среди которых в первую очередь можно выделить струйное и водовоздушное.

Как указывалось выше, оптимальным условием охлаждения боковой поверхности заготовки в ЗВО является равенство теплового потока, подведенного к фронту затвердевания и отведенного с боковой поверхности, то есть

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_n - T_{ox}), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности затвердевающего металла; α – эффективный коэффициент теплоотвода с боковой поверхности заготовки; T_n – температура наружной поверхности; T_{ox} – температура охлаждающего реагента.

Правая часть (1) соответствует тепловому потоку от центральных областей перегретого металла, проходящему через толщину затвердевшего металла к боковой поверхности заготовки. Поэтому величину этой составляющей можно оценить следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \approx -\lambda \frac{T_n - T_s}{\delta}, \quad (2)$$

где T_s – температура солидус металла слитка, δ – толщина затвердевшей корки.

Уравнение (1) с учетом (2) примет вид:

$$-\lambda \frac{T_n - T_s}{\delta} = \alpha (T_n - T_{ox}). \quad (3)$$

Тогда согласно (3) фактическую интенсивность теплоотвода с боковой поверхности заготовки в ЗВО можно оценить в соответствии с выражением (4)

$$\alpha = -\lambda \frac{(T_n - T_s)}{\delta (T_n - T_{ox})}. \quad (4)$$

Для серийного производства непрерывнолитой заготовки выражение (4) может быть использовано при проектировании ЗВО и выборе оптимальных условий теплоотвода по технологической линии вытягивания.

Алгоритм оценки интенсивности теплоотвода может быть организован следующим образом. Используя компьютерное моделирование, которое было протестировано как адекватное, рассчитываем толщину затвердевшей корки после выхода заготовки из кристаллизатора. Полученное значение является параметром для оценки интенсивности теплоотвода в зоне ниже кристаллизатора.

Таким образом, по расчетной толщине корки на предыдущем уровне (относительно кристаллизатора) рассчитываем коэффициент теплоотвода $\alpha = \alpha(z)$ на последующем уровне.

Ниже приведем результаты компьютерного моделирования реализации предложенного алгоритма.

В основу компьютерного моделирования положена технология получения непрерывного слитка в условиях комбината «Азовсталь».

На рис. 1 показано, как меняется толщина затвердевшей корки (кривая 1) и интенсивность теплоотвода (кривая 2) вдоль технологической линии вытягивания непрерывнолитой заготовки.

Из приведенных на рис. 2 кривых видно, что после выхода из кристаллизатора скорость затвердевания (по изотерме солидус) падает. Глубина твердожидкой фазы достигает 9 м от зеркала металла.

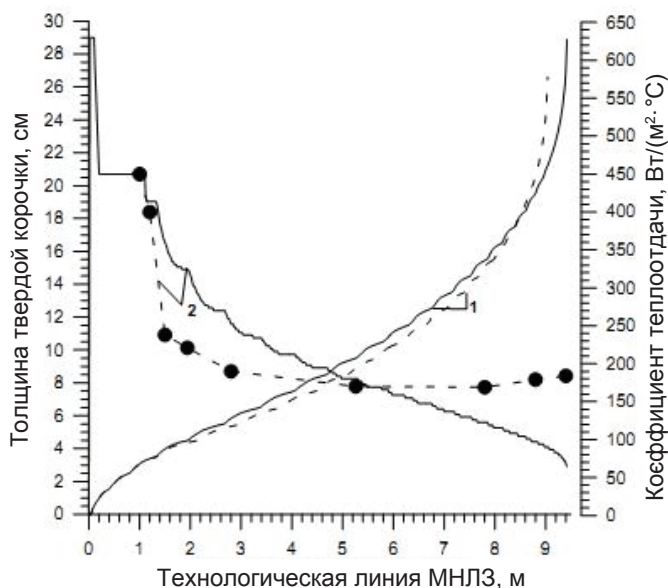


Рис. 1. Изменение толщины твердой корочки (1) и коэффициента теплоотдачи (2) с боковой поверхности непрерывнолитой заготовки по технологической линии МНЛЗ: - - - режим охлаждения в ЗВО МК «Азовсталь» $\alpha = \alpha(z)$; — предлагаемый режим охлаждения в ЗВО $\alpha = \alpha(\delta)$

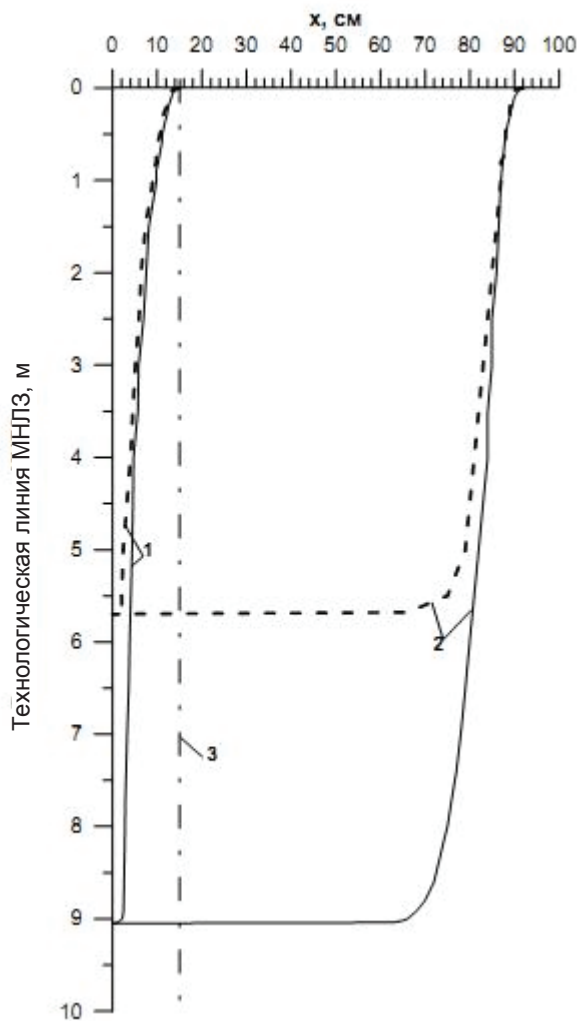


Рис. 2. Положение изотерм солидус (—) и ликвидус (- - -) по узкой (1) и широкой (2) граням по технологической линии МНЛЗ при затвердевании непрерывнолитой заготовки (3 – размер узкой грани)

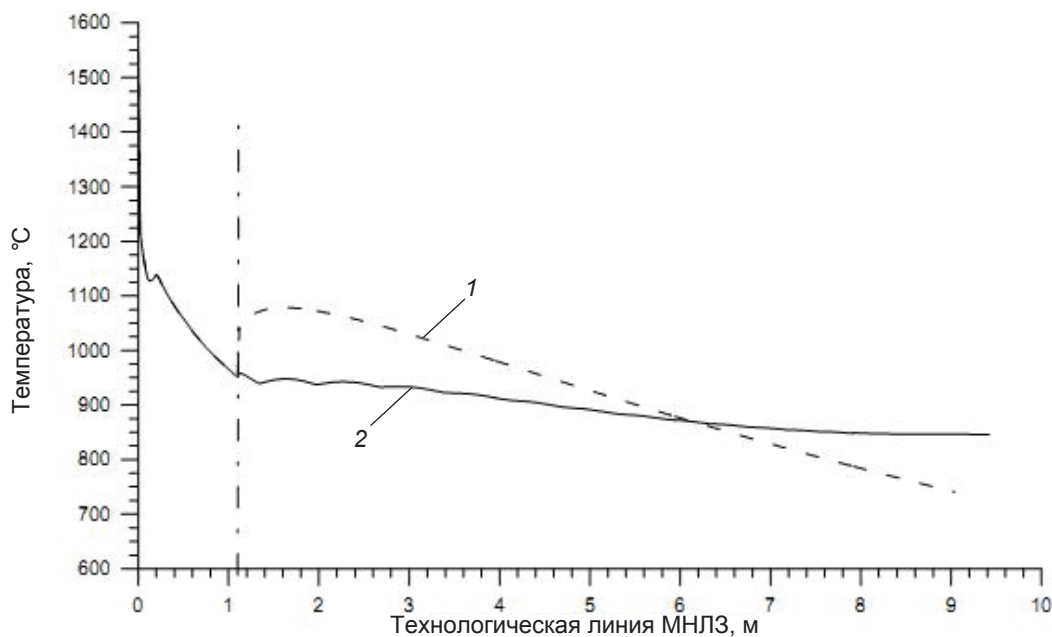


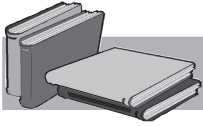
Рис. 3. Изменение температуры поверхности по середине широкой грани вдоль технологической линии МНЛЗ: --- - режим охлаждения в ЗВО МК «Азовсталь» $\alpha = \alpha(z)$; — — предлагаемый режим охлаждения в ЗВО $\alpha = \alpha(\delta)$

В процессе охлаждения температура наружной поверхности изменяется от температуры заливки до 950 °С при выходе из кристаллизатора. После выхода из водоохлаждаемого кристаллизатора интенсивность теплоотвода в зоне вторичного охлаждения падает, что приводит к повышению температуры наружной поверхности слитка (рис. 2, кривая 1). По достижении наружной поверхности температуры 1100 °С (на расстоянии 1 м от кристаллизатора) наблюдаем монотонное снижение температуры наружной поверхности слитка.

Используя предложенный алгоритм оценки изменения интенсивности теплоотвода в зоне вторичного охлаждения (рис. 1, кривая 2, сплошная линия), получили интенсивность теплоотвода в зоне вторичного охлаждения, которая обеспечивает плавное снижение температуры боковой поверхности заготовки (рис. 3, кривая 2).

Таким образом, наглядно показано, что использование предложенной методики исключило повторный разогрев боковой поверхности заготовки после ее выхода из кристаллизатора.

По указанному алгоритму может быть проведена оценка интенсивности теплообмена в области зоны вторичного охлаждения, которая обеспечивает оптимальные условия формирования непрерывнолитой заготовки и снижает вероятность появления условий способствующих появлению наружных трещин и дефектов, обусловленных повышенным термонапряженным состоянием.



ЛИТЕРАТУРА

1. Совершенствование системы вторичного охлаждения непрерывнолитой заготовки на основе реальной информации о тепловом состоянии слитка / А. Л. Кузьминов, А. В. Голубев, А. В. Кожевников, Н. А. Щеголев // *Металлург.* – 2009. – № 4. – С. 9-11.
2. *Самойлович Ю. А., Крулевецкий С. А., Горяинов В. А.* Тепловые процессы при непрерывном литье. – М.: *Металлургия*, 1982. – 152 с.
3. *Нисковский В., Карпинский С., Беренов А.* Машины непрерывного литья слябовых заготовок. – М.: Там же, 1991. – 272 с.
4. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев, С. В. Момот, Ю. Н. Белобров. – Донецк: *ДонНТУ*, 2002. – 536 с.
5. *Храпко С. А., Корзун Е. Л., Костецкий Ю. В.* Производство стали в ДСП. – Донецк.: *ДонНТУ*. – 2009. – 284 с.

Анотація

Тарасевич М. І., Корнієць І. В., Тарасевич І. М.

Вибір оптимальних умов тепловідводу з бічної поверхні безперервно литої заготовки в зоні вторинного охолодження

Запропоновано методику оцінки зміни інтенсивності теплообміну в зоні вторинного охолодження по товщині кірки, що затверділа. Вказаний режим охолодження забезпечує оптимальні умови формування безперервнолитої заготовки, виключає повторний розігрів бічної поверхні і знижує ймовірність появи зовнішніх тріщин і дефектів, обумовлених підвищеним термопружним станом.

Ключові слова

безперервне розливання, зона вторинного охолодження, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, тепловідвід, тверднення

Summary

Tarasevich N., Korniets I., Tarasevich I.

Selection of the optimum conditions of heatremoval with the lateralsurface of the billet continuous casting in secondary coolingzone

The technique of evaluation of heat exchange intensity in secondary cooling zone on the thickness of solidified crustis is proposed there. The cooling mode provides optimum conditions of continuously cast billets, eliminates repeated heating of the side surface and reduces the likelihood of conditions for to the emergence of exterior cracks and defects specified of high termo-stress state.

Keywords

continuous casting, secondary cooling zone, and mathematical modeling, computer simulations, heat removal, solidification

Поступила 20.10.14